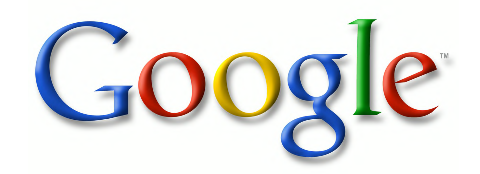


Lootens - Formation du Son - 1898.

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR LA

FORMATION DU SON

DANS

LES INSTRUMENTS A BOUCHE DE FLUTE

PAR

LE FRÈRE CH. LOOTENS, S. J.

Extrait de la *REVUE DES QUESTIONS SCIENTIFIQUES*, avril-juillet 1898

LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE A. HERMANN
Libraire de S. M. le Roi de Suède et de Norvège
PARIS, 8, RUE DE LA SORBONNE, 8, PARIS

1898

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR LA

FORMATION DU SON

DANS LES INSTRUMENTS A BOUCHE DE FLUTE

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR LA

FORMATION DU SON

DANS

LES INSTRUMENTS A BOUCHE DE FLUTE

PAR

LE FRÈRE CH. LOOTENS, S. J.

Extrait de la *REVUE DES QUESTIONS SCIENTIFIQUES*, avril-juillet 1898

LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE A. HERMANN

Libraire de S M. le Roi de Suède et de Norvège

PARIS, 8, RUE DE LA SORBONNE, 8, PARIS

1898

Imprimerie POLLEUNIS & CEUTERICK, 30, rue des Orphelins, Louvain.
Même maison à Bruxelles, 37, rue des Ursulines.

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR LA

FORMATION DU SON

dans les instruments à bouche de flûte

Le but de ce travail est de contribuer, par voie expérimentale, à résoudre la question de la formation et de la persistance du son dans les tuyaux sonores à bouche de flûte et dans les instruments de même genre, mais en limitant le problème au son partiel le plus bas émis par l'instrument, c'est-à-dire au son fondamental, ou à l'un des harmoniques (1). Conjointement avec les tuyaux, la catégorie des instruments à bouche de flûte comprend toute masse d'air, suffisamment isolée par des parois fixes, où un courant d'air prend l'initiative pour former le son.

Les expériences sur ces instruments présentent deux difficultés principales. La plus grande est la rapidité avec laquelle se succèdent alternativement les deux groupes de phénomènes qui produisent les ondes condensées et les ondes dilatées, ainsi que l'espace réduit où ils font leurs évolutions. La seconde est l'impossibilité de discerner le mouvement des courants dans un milieu de même composi-

(1) Lorsque l'on compte par sons partiels, le son fondamental est le premier; les harmoniques, qui ne sont plus alors mentionnés comme tels, changent de numéro d'ordre : le premier harmonique devient le deuxième son partiel, et ainsi de suite.

tion. Pour vaincre cette seconde difficulté, il suffit, par une disposition décrite plus loin, de faire passer sur un foyer de tabac allumé l'air qui alimente l'instrument. Cet air, chargé de fumée, se distingue alors nettement de l'air ambiant; de même, un courant d'air limpide trahit les mouvements excités dans un milieu chargé de fumée. Quant à la première difficulté, il a fallu, pour la tourner, construire des tuyaux et des appareils de toute forme, les uns sonores, d'autres imparfaits au point de vue musical; d'autres encore, en grand nombre, rendus à dessein presque entièrement ou même totalement muets, afin de supprimer une partie des phénomènes des deux groupes et de surprendre isolément les autres.

En 1877, le R. P. Van Tricht a publié, dans le JOURNAL DE PHYSIQUE, t. VI, des expériences indépendantes qu'il avait faites avec une partie des mêmes appareils, mis à sa disposition. Il y a joint ses appréciations personnelles. Depuis lors, j'ai construit plus de deux cents nouveaux tuyaux ou appareils divers, pour élucider davantage la question. Je suis bien loin toutefois de la considérer comme résolue, même dans les limites restreintes où je me suis renfermé. Plusieurs solutions n'ont encore, en effet, qu'une valeur conjecturale. Mais du moins ces conjectures ne sembleront peut-être pas dénuées de fondement; et, en tout cas, les faits bien constatés pourront en suggérer de plus plausibles. Peut-être de nouvelles recherches me permettront-elles à moi-même d'éclaircir quelques-uns des points encore douteux.

Dans le présent mémoire, après quelques détails sur le matériel opératoire, je décrirai, comme expériences préliminaires, certaines propriétés essentielles des courants d'air. J'essayerai ensuite de montrer ce qui se passe dans les divers instruments à bouche de flûte, soit pour les mouvements de l'air, soit pour ceux des parois. Enfin, dans un appendice, j'appellerai l'attention sur certains

phénomènes inaperçus ou négligés, qui accompagnent inévitablement la production du son par les corps sonores oscillants, et qui ont leurs analogues dans les tuyaux et les instruments similaires.

MATÉRIEL OPÉRATOIRE

Soufflerie. — Pour beaucoup d'expériences, le courant qui alimente le tuyau doit être rigoureusement constant. On l'obtient avec une soufflerie dont le réservoir est à plis renversés, c'est-à-dire à plis alternativement rentrants et sortants.

Sommier à courants variables. — Les sommiers à

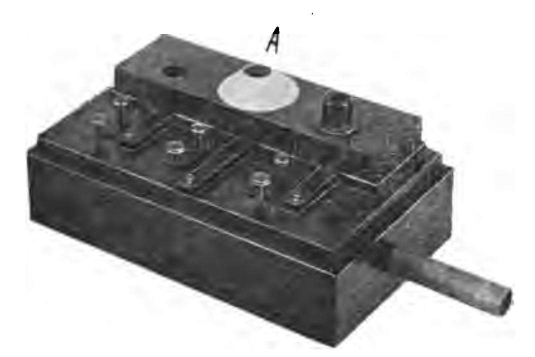


Fig. 1.

tuyaux sont assez connus. Je ne m'y arrêterais pas, s'il ne fallait, dans bien des cas, des courants dont on ne peut régler la force que par tâtonnements et qui néanmoins doivent être coupés et reproduits, sans la moindre variation, au cours d'une même expérience. On emploie pour cela la disposition suivante.

Sur le sommier (fig. 1), on voit deux touches et un registre pour chaque soupape correspondant au trou qui est sur le prolongement. La plus saillante des deux touches est celle qu'on enfonce en y appuyant le doigt. Celle qui est sur le devant a sa tige filetée : on l'enfonce

en la tournant. Lorsqu'on s'en sert, on néglige l'autre, et on commande le courant avec le registre qui fait l'office de touche. Celui du milieu est ouvert.

Sommier à fumée. — Dans ce sommier (fig. 2), A est une chambre qu'on fixe avec le crochet *d*, après l'avoir rabattue pour emprisonner l'air. Les trous *c*, *c'* correspondent directement avec le grand porte-vent du soufflet, P.

Entre *a* et *c*, un foyer cylindrique, à fond de toile métallique, repose sur une épaisse plaque de plomb, qui garantit le sommier en absorbant la chaleur. Cette plaque est per-



Fig. 2.

cée d'une ouverture qui correspond avec le trou *b'*. Les deux branches d'un porte-vent bifurqué sont fixées dans les trous *b'* et *c'*. Le foyer étant bourré de tabac, on y place de l'amadou allumé.

Pour avoir un courant de fumée, on repousse le registre de *c'*, et on tire celui de *b'*. Pour le changer en courant d'air, *sans interruption*, on tire d'abord *c'*, puis on repousse *b'*.

Au besoin, on insère en *a'* un porte-vent pour faire par-

ler un deuxième tuyau ou une deuxième bouche du même tuyau. Comme on le voit, les registres tiennent lieu de soupapes, qui ne résisteraient pas à la chaleur.

Tuyaux et instruments analogues à bouche de flûte. — Je considérerai comme *tuyaux sonores à bouche de flûte* tous ceux qui répondent à la description qu'en donnent les traités de physique ; tels sont ceux qui composent les jeux de fond des orgues. Plus généralement, j'admets dans cette famille d'instruments toute construction où une masse d'air, suffisamment isolée par des parois fixes, rend un son musical sous l'initiative d'un courant gazeux. On sait, d'ailleurs, qu'un courant liquide produit des effets analogues. Dans tous ces appareils, ce sont les mêmes phénomènes qui produisent le son ; ils sont régis par les mêmes lois.

La presque totalité des tuyaux qui ont servi aux expériences, étaient rectangulaires et en bois. On distingue dans ces tuyaux la *paroi de face*, qui porte la bouche, la *paroi postérieure* et les *parois latérales*. J'appellerai *fond* du tuyau ce que les facteurs d'orgues nomment le biseau ou bloc: c'est la paroi qui limite, au voisinage de la bouche, la longueur de la colonne aérienne. Le *tampon* est la pièce ou paroi mobile opposée au fond dans les tuyaux bouchés.

La *hauteur de la bouche* est la distance d'une *lèvre* à l'autre ; sa *largeur* se mesure dans l'autre sens. La fente comprise entre la lèvre inférieure et le fond est la *lumière*, qui livre passage au courant. La largeur de la lumière est donc la distance de la lèvre inférieure au fond ; sa longueur est la largeur de la bouche.

Pour former la lèvre supérieure, la paroi de face est amincie en un *talus*, auquel la plupart des auteurs donnent le nom de *biseau*. Je suivrai cet usage, bien qu'il soit contraire à celui des facteurs d'orgues.

A moins d'indications contraires, toutes les mesures se rapportent à l'*intérieur* du tuyau ou de l'instrument. En

général, les dimensions sont indiquées par un produit de trois nombres : le premier représente la longueur, les deux autres, la section transversale. Ainsi $0^m,62 \times 75^{mm} \times 50^{mm}$ signifie que le tuyau a une longueur de 62 centimètres et une section de 75 millimètres sur 50.

La *taille* du tuyau est sa section transversale considérée par rapport à sa longueur.

Pour permettre l'observation des courants à l'intérieur des tuyaux, les parois latérales sont entièrement en verre pour les petits et les moyens. Pour les plus grands — jusqu'à trois mètres — elles sont vitrées à hauteur suffisante, ordinairement des deux côtés.

Pour un grand nombre d'expériences, il est avantageux de rendre mobiles les chambres à air des tuyaux.

1° *Chambre mobile à coulisses.* Généralement, pour faire la lèvre supérieure, on amincit la paroi du côté extérieur ; ici, on en trouvera qui sont amincies sur le côté intérieur, parce que cette construction est plus avantageuse pour l'emploi des chambres mobiles, qui, avec des lèvres inférieures, mobiles aussi parfois, sont indispensables pour beaucoup d'expériences.

Soit la coupe d'un de ces tuyaux (fig. 3) : *a* est un trou dans la partie fixe de la chambre ; il correspond, dans la partie mobile, à une ouverture rectangulaire *a'*, assez longue pour laisser, quelle que soit sa position, le trou *a* tout ouvert ; *b* est la lèvre inférieure mobile ; *d* un pignon qui engrène dans la crémaillère *c*, fixée au tuyau, et qui permet de donner facilement à la bouche la hauteur voulue. La lèvre inférieure, d'après sa position, donne une lumière plus ou moins large et une direction variable au courant initial. Deux coulisses, attachées sur les côtés du tuyau, retiennent la chambre en place.

Les chambres qui ne correspondent pas avec une fausse chambre, comme celle de la flûte, sont percées, à l'extérieur, pour l'introduction d'un porte-vent relié au sommier. Il en est de même de celles qui doivent être

retournées. Dans ce cas, le fond du tuyau devient parfois la lèvre supérieure, et, soit dit en passant, le son monte.

2° *Chambre tournante ou à pivots.* Dans ce tuyau, le prolongement *a* du pied (fig. 4) est un porte-vent élastique, relié à la chambre *b*; *c* est une lèvre mobile.

On verra au besoin, sur les dessins perspectifs de ces

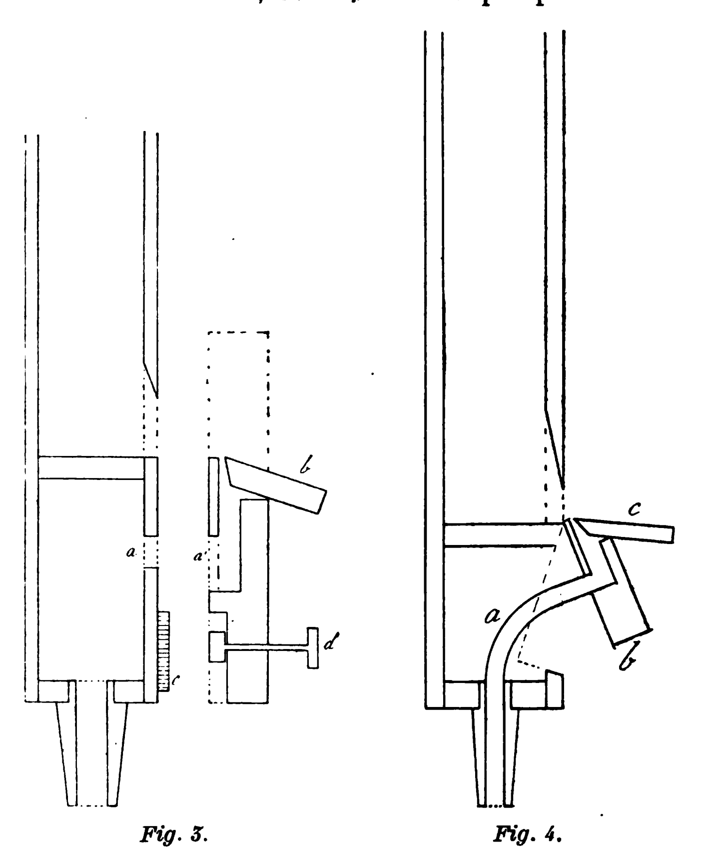


Fig. 3. *Fig. 4.*

tuyaux, des détails qu'il serait superflu de donner ici. Un segment de cercle denté est vissé sur la chambre; il engrène dans un pignon correspondant, fixé sur le tuyau. Parfois la crémaillère tient au tuyau, et le pignon à la chambre.

Hélices. — On peut observer les courants, aux extré-

mités et dans l'intérieur des tuyaux, au moyen d'hélices (fig. 5). Ces hélices sont composées d'un moyeu en liège, de forme cubique, traversé par une épingle à deux pointes, et qui porte, collées sur ses faces, des lamelles de moelle de sureau : pour avoir ces lames plus longues, on peut les couper suivant l'axe de la tige.

L'épingle, qui sert d'axe à l'hélice, est maintenue dans deux trous pratiqués dans la monture. Celle-ci est un fil de laiton recourbé *abc*, dont les branches *b* et *c* sont

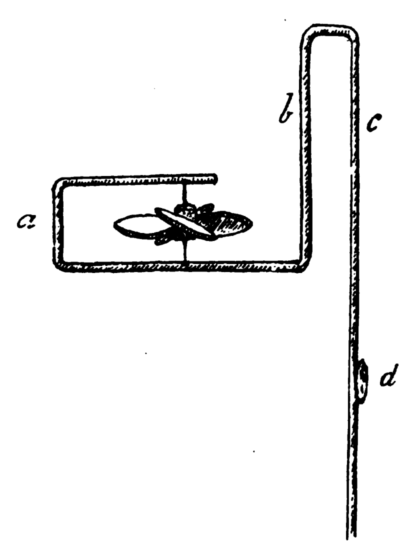


Fig. 5.

engagées dans deux rainures de la paroi postérieure. Un bouton *d* sert à la faire monter ou descendre.

On peut aussi faire des hélices en laiton. Au centre d'un disque très mince, on fait un petit enfoncement qui sert de chape; quelques coups de ciseaux découpent les ailettes. Pour monter cette hélice, on supprime la partie *a* de la monture, et le fil, limé en pointe, est recourbé à distance convenable pour supporter l'hélice.

Des hélices semblables, convenablement montées et placées devant les chambres, accusent le courant d'entraîne-

ment du courant initial. On peut de même en descendre dans les tuyaux. Dans tous les cas, le sens de la rotation indique la direction du courant, dès qu'il commence à agir.

EXPÉRIENCES PRÉLIMINAIRES

Ces expériences mettent en évidence, dans les courants d'air, quelques propriétés qui jouent le rôle prédominant dans la mise en vibration de la colonne aérienne.

Un courant, en jaillissant, pousse devant lui et condense l'air qu'il rencontre. Il produit un bruissement qui est en rapport avec sa vitesse d'écoulement. On peut s'en assurer en soufflant, par la bouche, à travers les lèvres assez rapprochées.

Le courant entraîne par frottement la couche qui l'enveloppe immédiatement : cette couche agit de même sur la couche la plus proche, et ainsi de suite. Il se fait donc une affluence continue, aux dépens de l'air ambiant qui se dirige vers le courant primaire et remplace l'air entraîné pour être entraîné à son tour. Je nommerai *courant d'entraînement* ou d'*affluence* ou *accessoire*, le courant qui afflue vers le *courant initial* ou *primaire* ou *principal*.

Lorsqu'un obstacle s'oppose à la libre affluence du courant, l'entraînement pousse plus loin la raréfaction de l'espace abrité. Cet espace, offrant moins de résistance, fait dévier de son côté le courant principal. Si l'obstacle s'oppose irrégulièrement à l'affluence, le courant se dirige du côté le plus abrité.

Quand un courant avance au contact d'un obstacle, il s'y applique si sa direction fait, avec celle de l'obstacle, un angle trop aigu pour admettre l'air affluent. Toutefois, si le courant est assez violent, ou si l'ouverture qui lui donne issue est d'assez grande dimension, il se divise en deux parties. L'une se détache du côté de l'obstacle pour le suivre ; l'autre avance à peu près dans la direction

initiale — plus ou moins — suivant la nature, les dimensions et la forme de l'obstacle.

Pour nous assurer expérimentalement de ces propriétés, nous choisirons, de préférence, des appareils faciles à réaliser et dont plusieurs se trouvent à la disposition de chacun.

1. On tient horizontalement devant la bouche un portrait photographié, petit format, le feuillet protecteur, en papier de soie, pendant librement au dehors. On souffle de manière que le courant ne dépasse pas les côtés, mais s'échappe dans la direction du feuillet. La pression de l'air sur le feuillet est alors diminuée, par l'entraînement, sur une plus grande surface du côté du courant que du côté opposé, et cela avec plus d'énergie à l'origine du courant. Le feuillet se relève et se maintient, en flottant, dans le prolongement du portrait.

2. On tient le portrait verticalement devant la bouche, le feuillet librement suspendu au revers à petite distance. Il se colle sur la carte, lorsqu'on souffle perpendiculairement sur le portrait et que le courant s'échappe sur les côtés, ce qui raréfie l'air de l'espace limité derrière par le feuillet.

3. A l'extrémité d'un tube à mince paroi, ayant environ 10^{mm} de diamètre et tenu horizontalement, on enfile une rondelle de papier de 18 à 30^{mm}, dont le trou laisse 1^{mm} de jeu. Quand on souffle dans le tube, la pression de l'air sur le disque, du côté du courant, est diminuée par l'entraînement et ne fait plus équilibre à la pression normale sur l'autre face. Le disque est donc poussé dans le courant, qui le projette au loin.

Si la paroi du tube était trop épaisse, la surface du courant, trop réduite, ne produirait plus un entraînement suffisant pour enlever la rondelle, quelque rapprochée qu'elle fût de l'extrémité.

4. Un jeu d'enfants fournit des expériences très instructives. Il consiste à faire voltiger sur un tuyau de pipe un petit pois traversé par une épingle. Quand il est suspendu

dans le courant, on peut, sans le faire tomber, mouvoir le tube à droite ou à gauche, et même l'incliner de plusieurs degrés.

5. Un tube de la grosseur d'un crayon est fermé à un bout par une plaque mince, percée d'un trou d'un bon millimètre, sur laquelle on dépose une boule de charbon de bois. Pour donner une bonne assise à cette boule, il est bon qu'elle dépasse un peu la paroi du tube. Le souffle de la bouche, plus facile à régler, réussit mieux que celui de la soufflerie.

Lorsqu'on souffle dans le tube, la boule, au lieu de tendre, comme on pourrait le croire, à sortir de ce courant exigu, s'y maintient au contraire, parce que le courant d'entraînement l'y repousse sans cesse. Parfois, pendant les moments de repos, la boule vient se poser sur le côté du tube; on peut d'ailleurs la placer dans cette position. Alors, un souffle modéré la fait remonter dans le courant primaire; mais un souffle brusque la fait d'ordinaire traverser ce courant et sauter du côté opposé. C'est qu'un souffle modéré suscite un courant d'entraînement modéré qui ramène doucement la boule dans le courant, tandis qu'un souffle violent suscite un courant d'entraînement violent, lequel, comme un choc brusque, donne à la boule une impulsion suffisante pour la faire passer à travers le courant primaire.

6. A proximité d'un trou du sommier par lequel passe un courant, on dresse un carré de papier. Il s'approche du trou en tremblotant, finit par empiéter sur lui et est alors lancé de côté. Une carte de visite se tient debout en se balançant; mais, à cause de son poids plus considérable, elle ne peut glisser sur le sommier comme le carré de papier. Elle reste donc à distance du trou, sans empiéter, et, par suite, elle n'est pas projetée par le courant.

Dans les deux cas, le courant primaire et le courant d'entraînement empêchent l'objet de tomber de leur côté.

7. Un petit abat-jour en papier A (fig. 1 et 6) est placé, la grande base en bas, sur un trou du sommier. Le courant, en passant, entraîne une partie de l'air qu'il contient; la pression extérieure est telle que, si l'ouverture du sommet ne correspond qu'à peu près avec le trou, un saut brusque les fait coïncider dès le premier moment, et l'abat-jour reprend sa forme régulière, s'il n'a pas été trop déformé. S'il a été trop déformé, un courant d'entraînement s'insinue sous la base.

Un abat-jour en papier pelure d'oignon s'aplatit sur le sommier.

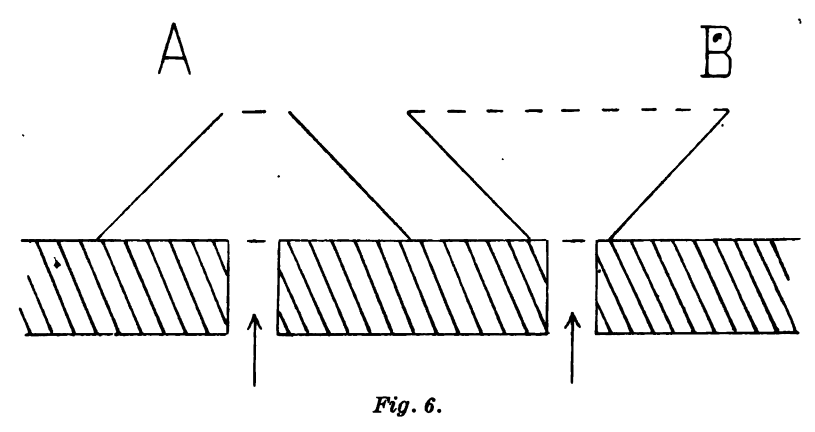


Fig. 6.

Le même abat-jour, placé sur sa petite base, comme en B (fig. 6), est rejeté de côté, à moins qu'il ne soit assez léger pour être emporté par le courant. Le vide se fait à l'intérieur, et le papier cède à la pression extérieure.

8. A un tuyau, dont la chambre à air et la paroi de face sont seules conservées, sont adaptées deux planchettes mobiles *a* et *b* (fig. 7), sur lesquelles s'avance le courant. Une troisième planchette *c* maintient le parallélisme entre *b* et la paroi de face *f* qui ne sert plus que de charpente. Un contrepoids *p*, attaché par un cordon à la planchette *b*, maintient l'écart entre *b* et *f* et détermine l'angle *X*, qui est l'élément principal de l'appareil. Des bouts de ruban, collés sur les joints, servent de charnières. Un

manomètre à eau *m* indique la pression dans la chambre à air.

Quand la pression dans la chambre est de 60^{mm} d'eau et que l'angle X mesure environ 138°, le courant suit la direction du biseau *a*. A mesure qu'on ouvre l'angle, la

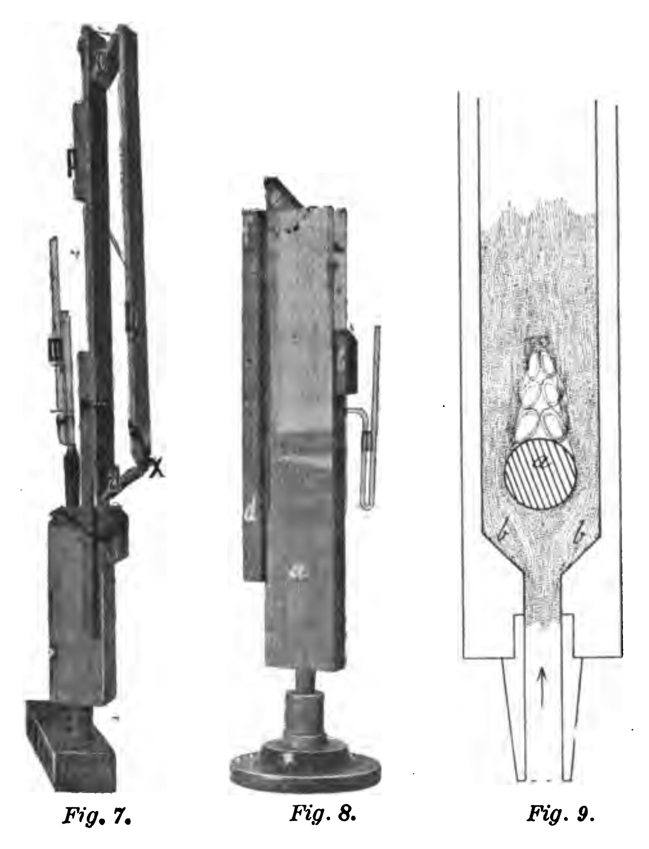


Fig. 7. *Fig. 8.* *Fig. 9.*

tendance du courant à dévier se prononce davantage; une augmentation de 6° à 8° suffit pour lui faire joindre la paroi *b*.

La pression dans la chambre étant réduite à 30^{mm}, il suffit d'augmenter l'angle X d'une dizaine de degrés environ, pour obtenir le résultat de l'expérience précédente.

9. Ceci nous rappelle et fait comprendre une expérience très connue, où l'on éteint une bougie en soufflant *à travers* une bouteille.

Le souffle ne peut pas s'échapper par la tangente, qui fait un angle trop aigu avec la surface cylindrique pour admettre un courant d'entraînement ; il dévie, et, comme l'angle reste toujours le même, il dévie aussi longtemps que la force d'impulsion n'est pas épuisée.

La même expérience nous révèle aussi pourquoi le vent, surtout s'il est violent, plonge en donnant de travers sur des plis de terrain et des éminences dénudées.

10. Une chambre de tuyau *a* (fig. 8) a une hauteur de 35^{cm} et une section de $82^{mm} \times 28^{mm}$; la lumière, faite sur le petit côté, a une longueur de 24^{mm} et une largeur de $1^{mm},5$. L'air est introduit par le trou *b* de la lèvre ; un manomètre *m* indique une pression de 43^{mm} d'eau. Une enveloppe *df* tient lieu de trois parois du tuyau ; la paroi postérieure est en bois, les deux parois latérales sont en verre ; l'enveloppe peut être montée ou abaissée à la main ; *e* est un prisme triangulaire isocèle, que l'on peut, à volonté, enlever ou placer sur le fond du tuyau. Ce fond est d'équerre avec la paroi postérieure : en y appliquant le prisme, on a un angle de 45 degrés.

Le prisme étant enlevé et l'enveloppe descendue, le courant passe dans sa direction normale, ou à peu près. En soulevant lentement l'enveloppe jusqu'à 10 centimètres au-dessus du fond, l'air qui passe au-dessus de l'enveloppe pour remplacer celui qui est entraîné, n'y suffit plus ; le courant s'est déjà incliné, et de petites portions de fumée s'en détachent et se dirigent vers le fond. L'enveloppe étant arrivée à 12^{cm} environ de hauteur, le courant joint brusquement le sommet de la paroi postérieure, et un tourbillon, qui remplit l'espace abrité, se forme à ses dépens. Son mouvement giratoire n'est visible que pendant quelques instants ; une seconde environ suffit pour

expulser tout l'air pur qui se trouvait sous le courant, et les mouvements du tourbillon ne sont plus distincts.

Le courant prend un grand développement ; son côté inférieur suit à peu près la direction qui va de la lumière au sommet de la paroi postérieure.

Si l'on abaisse lentement l'enveloppe, le courant la suit ; quand elle ne dépasse plus le fond que d'environ 8^{cm}, le dessous du courant a pris à peu près la direction horizontale ; puis, en descendant encore l'enveloppe, il reprend la direction qu'il suivait avant sa jonction avec le sommet.

Le prisme étant fixé sur le fond et l'enveloppe abaissée, le courant s'écarte très peu de sa direction normale ; en soulevant l'enveloppe de 6^{cm} environ, le courant est notablement incliné ; de petites portions de fumée se détournent vers le bas ; un peu avant que l'enveloppe abrite tout le prisme, le courant s'applique sur le fond, et il y reste jusqu'à ce que l'enveloppe soit descendue de 3^{cm}. Le dessous du courant, à l'extérieur, suit la direction du fond, 45°.

11. Deux glaces parallèles sont maintenues à une distance de 6 à 7^{mm}, par un disque de bois, garni de peau sur ses deux faces (fig. 9) et dont la section est figurée en *a*. Elles sont serrées dans un encadrement librement ouvert à l'une des extrémités ; l'autre est fermée et traversée par un tube qui donne passage au courant.

Quand le courant passe, il se divise et entraîne l'air qui se trouve derrière l'abri ; les couches limites du courant divisé se rapprochent et tendent à se mettre en équilibre avec la portion du milieu qu'elles longent et raréfient. Deux tourbillons à plusieurs circonvolutions dérivées se forment à leurs dépens et y maintiennent une densité qui dépend de la vitesse du courant et des dimensions de l'obstacle.

Ici, comme dans d'autres expériences, l'espace abrité est presqu'aussitôt envahi par la fumée ; mais en faisant succéder un courant d'air pur, le spectacle se renouvelle

en sens inverse : l'air pur envahit l'espace chargé de fumée. On fait alterner ces courants à volonté.

Le fond *bb* est coupé à 45°. Quand il est plan, il s'y forme de petits tourbillons.

12. La pratique des facteurs d'orgues fournit une autre preuve de l'efficacité de l'entraînement de l'air. Les organiers font des crans ou entailles dans le côté du fond opposé à la lèvre inférieure. La lumière affecte ainsi la forme d'une scie, dont les dents sont tournées vers l'intérieur du tuyau. Cette forme augmente la surface du courant, par conséquent l'entraînement de l'air et la raréfaction à la base de la colonne aérienne, « ce qui facilite la mise en harmonie des tuyaux » et « leur mise en ton » (1).

TUYAUX A BOUCHE DE FLUTE

Bruissement. — Quand on abaisse la touche qui correspond à un tuyau, le courant initial saillit de la lumière et atteint la lèvre supérieure en produisant un *bruissement*. Il n'est pas aisé d'éclaircir ce phénomène par l'expérience. Étant réduit aux hypothèses, je crois pouvoir proposer la suivante, dont de nouvelles recherches pourront contrôler la valeur.

Supposons que le courant gazeux, saillissant de la lumière, ait, à l'orifice d'écoulement, une pression de 2 atmosphères. La densité de l'air étant 2, la compression a élevé celle du courant à 4 et réduit son volume de moitié. La première tranche *a*, en saillissant, revient à sa densité normale 2, et à son volume primitif. Mais, par l'effet de son élasticité, elle continue à se dilater d'une quantité en rapport avec sa compression première. Une série d'oscillations la ramène à sa densité et à son volume normal.

(1) Hamel, *Manuel du facteur d'orgues*, t. III, pp. 357 et 157.

Admettons que la saillie d'une tranche et une oscillation simple se font dans un même temps. La première tranche *a* est suivie d'une deuxième tranche *b*, qui saillit en se dilatant pendant que la première se contracte. Une troisième tranche *c* se dilatera en même temps que la première, et ainsi de suite ; la phase de la série impaire étant toujours inverse de celle de la série paire. Ces dilatations et ces contractions se font dans tous les sens.

La tension des tranches diminue à mesure qu'elles sont plus éloignées de l'orifice. Je crois pouvoir admettre que la durée des oscillations diminue en même temps; ainsi, sur toute la hauteur de la bouche, les sons correspondant à ces oscillations changent constamment de hauteur et d'intensité, et c'est là ce qui constitue le bruissement.

Le bruissement est donc *une confusion de sons dont aucun ne domine.* Le courant initial donne le branle à tout le système et au milieu ; il les met en vibration, et cela bien avant d'avoir atteint la lèvre supérieure, car sa vitesse est bien inférieure à celle des ondes qu'il provoque.

Le bruissement persiste aussi longtemps que le tuyau parle.

Ainsi, le courant initial est en vibration sonore. Il agit directement sur l'orifice d'écoulement et, par son intermédiaire, sur l'air comprimé qui afflue, sur le milieu et sur les obstacles qu'il rencontre. Indirectement, il agit sur tous les corps qui sont à proximité. Tel est le premier rôle que joue le courant initial des tuyaux sonores et de tous les instruments régis par les mêmes lois. Suivons-le maintenant, à l'aide de nos tuyaux à fumée, dans les diverses phases de son trajet ; on consultera au besoin les légendes que portent, dans la fig. 10, les courants qui se forment dans la colonne aérienne et à l'extérieur du tuyau.

Le courant initial s'écarte de sa direction normale ; il s'infléchit du côté de la colonne aérienne, parce que l'afflux de l'air ne se fait pas librement de ce côté comme

au dehors. Le courant empiète ainsi sur la colonne aérienne et en augmente la masse. Il pousse devant lui, en le condensant, l'air qu'il rencontre, et provoque des courants d'entraînement à l'extérieur et à l'intérieur. C'est en *v*, à l'origine du courant, que la raréfaction résultant de l'entraînement est poussée le plus loin.

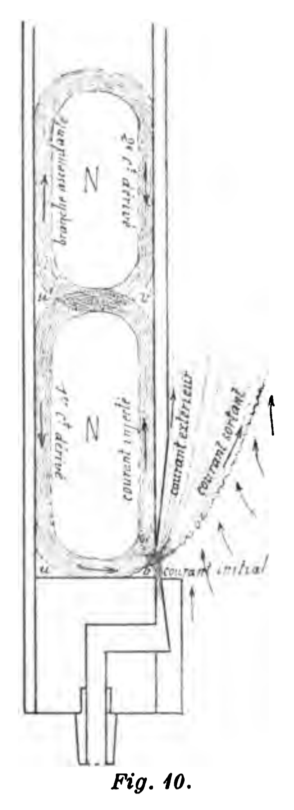


Fig. 10.

En atteignant la lèvre supérieure, le courant voile la bouche, et isole de ce côté la colonne aérienne. A la lèvre supérieure, le courant se divise. Une partie passe au dehors du tuyau : c'est le *courant extérieur ;* l'autre partie pénètre à l'intérieur : c'est le *courant injecté.* Celui-ci augmente la masse d'air à l'intérieur du tuyau et continue la raréfaction au fond, ainsi que la condensa-

tion et le refoulement d'une partie de la colonne aérienne. Sous ce multiple travail, il fléchit et se dirige du côté où il trouve une moindre résistance, c'est-à-dire vers la paroi postérieure. Mais avant d'atteindre cette paroi, il se bifurque en deux branches, l'une descendante, l'autre ascendante.

La branche descendante du courant injecté joint la paroi postérieure, la longe en descendant, rase le fond et aboutit au courant initial qu'elle traverse par intermittence : c'est le *premier courant dérivé*.

On peut admettre que la progression de son extrémité terminale se fait par aspiration. Il est vrai que l'air du courant injecté suffit et au delà pour restituer celui qui a été entraîné. Remarquons cependant qu'en entraînant cet air, le courant n'a fait qu'un déplacement dont sa masse profite, bien qu'il perde en même temps un peu de sa force d'impulsion.

La seconde branche du courant injecté, au lieu de descendre vers le fond du tuyau, continue sa course vers le sommet en longeant la paroi postérieure ; je la nomme branche ascendante injectée ou simplement *branche ascendante*.

Cette branche se trouve dans des conditions analogues à celles du courant injecté lui-même. En *v'* elle fait, conjointement avec la partie du courant injecté qui traverse le tuyau d'une paroi à l'autre, un vide partiel, comme celui qui se fait en *v*. Pour répondre à cet appel qui se fait en *v'*, la branche ascendante se détourne, traverse le tuyau, longe, en descendant, la paroi antérieure et va se perdre dans le premier courant dérivé, en traversant le sommet du courant injecté, là où celui-ci passe d'une paroi à l'autre. Il se forme ainsi un *second courant dérivé*. Ce courant, comme le premier — et à plus forte raison — achève sa course par aspiration. Il a monté dans un milieu plus dense.

J'appelle *cyclones* ces deux groupes de courants. En

général, on peut définir un cyclone : *un courant en suscitant un autre qui va le traverser par intermittence près de son origine*. Les espaces circonscrits N, N, en sont les noyaux. Dans les espaces *u*, *u'* et *v'*, il y a peu ou point de mouvement.

Quand l'air du courant injecté est en excès pour constituer les cyclones, l'excédent s'échappe par l'extrémité ouverte du tuyau : c'est le *courant de dégagement*. Si l'air injecté est en défaut, un courant entre au contraire par appel : c'est le *courant supplémentaire*. S'il est exactement ce qu'il faut, il n'y a pas de mouvement de transport au-dessus des cyclones.

Les cyclones, tels qu'ils sont dessinés dans la figure, ne se présentent ainsi, sans variation tant que le tuyau parle, que dans un petit nombre de tuyaux *sonores*, c'est-à-dire dont les dimensions répondent aux règles de la facture d'orgues. D'ordinaire, les espaces N, *u*, *u'*, *v* et *v'*, d'abord libres de fumée, sont envahis après un temps plus ou moins long, variant d'un tuyau à un autre.

Dans les tuyaux bouchés, les cyclones se forment comme dans les tuyaux ouverts ; mais dans ceux-ci le premier cyclone est souvent le plus grand et, quand on bouche le même tuyau, il devient d'ordinaire le plus petit des deux. Au-dessus, on ne voit aucun mouvement de transport ; ce dont on s'assure en retournant le tuyau, le tampon en bas. La fumée, qui est refroidie, s'y amasse et n'accuse pas de mouvement.

Il nous reste à voir comment se fait l'intermittence de la saillie du courant dérivé du premier cyclone : c'est le seul dont j'ai pu faire, avec quelque détail, l'étude expérimentale. Le second, à cause de sa position presque inabordable, a dû être négligé et n'a pas révélé ses fonctions. C'est une lacune que pourront combler ceux qui se sentiraient portés à continuer ces recherches.

Intermittence de la saillie du courant dérivé. — Le premier courant dérivé doit, en partie, sa progression à l'aspi-

ration que produit le courant initial. Il progresse à travers un milieu qui non seulement est moins dense, mais qui diminue graduellement de densité sur tout son parcours. Arrivé au courant initial, il le traverse au contact de la lèvre supérieure. A partir de ce point, je le nomme *courant sortant*.

Son passage à travers le courant initial lui donne une impulsion qui le relève et le rapproche du courant extérieur ; mais les deux ne se confondent pas toujours au point qu'on ne puisse les distinguer l'un de l'autre. En faisant dévier le courant sortant, le courant initial est dévié à son tour vers l'extérieur. Les deux courants, initial et sortant, paraîtraient même devoir se composer en un seul. Mais cette composition ne peut être ni régulière ni continue ; elle ne peut se faire que partiellement et par intervalles correspondant aux intermittences de la saillie du courant dérivé.

Voici comment on peut, je pense, se représenter la succession des phénomènes.

Le courant initial, dévié vers le dehors, augmente, en force et en volume, le courant extérieur ; mais tout ce que gagne ce dernier, le courant injecté le perd : le courant dérivé, qui en provient, perd donc en proportion. Bientôt il est trop affaibli pour empêcher le courant initial de reprendre sa direction première vers l'intérieur. Alors le courant injecté se renforce et, par son intermédiaire, le courant initial restitue au courant dérivé la force et le volume que celui-ci vient de dépenser pour le faire fléchir. Ayant ainsi repris sa vigueur première, le courant dérivé fait de nouveau dévier le courant initial. Les deux phénomènes se succèdent alternativement : la saillie du courant dérivé ne se fait ainsi que par intermittence. Toutefois, les parois jouent ici un rôle capital, sur lequel j'aurai à insister plus tard.

Les saillies et les rentrées alternatives du courant initial, ces flexions successives d'un côté et de l'autre font

varier constamment la densité de la colonne aérienne dans le voisinage de la bouche. Ces variations se propagent de bas en haut, dans tout le tuyau et au dehors. Elles seront, plus loin, examinées en détail, en suivant les phases de la progression du premier cyclone.

Le mécanisme de la formation du premier cyclone fait comprendre celle du second.

Souvent les plus grands tuyaux donnent les plus petits cyclónes, relativement à leurs dimensions.

Remarquons en passant que, quelle que soit la densité moyenne de la colonne aérienne, elle ne peut pas être la même partout.

Le courant sortant est ondulé d'une manière remarquable, qui accuse nettement ses saillies intermittentes. Quand un tuyau saute à un ton plus élevé, les ondulations sont réduites en dimension et augmentent en nombre ; l'effet est inverse quand il passe à un ton plus bas.

Autour des courants, surtout devant la bouche et la chambre, il y a des courants accessoires considérables.

Phases du premier cyclone. Première phase. — Le courant initial *a* (fig. 11, A), au moment où il atteint la lèvre supérieure, a augmenté la masse de la colonne aérienne de toute la partie *c*, qui a empiété sur l'intérieur du tuyau. Il s'est fait un déplacement avec condensation, qui se propage principalement de bas en haut. Au fond du tuyau se fait une raréfaction produite par l'entraînement de l'air au contact du courant initial. Cette raréfaction se propage dans tous les sens, et de bas en haut, indépendamment de la condensation qui se fait au-dessus; elle l'atteint, mais ne la dépasse pas.

Les flèches indiquent les courants d'entraînement.

Deuxième phase. — Le courant injecté est formé ; il a progressé jusqu'au point où il va se bifurquer (fig. 11, B). La masse de la colonne aérienne a été de nouveau

augmentée, sa condensation de même. Une onde condensée est en formation.

Le courant injecté a augmenté la raréfaction, principalement au bas du tuyau. Le courant d'entraînement est limité dans le haut par la courbure du courant injecté ;

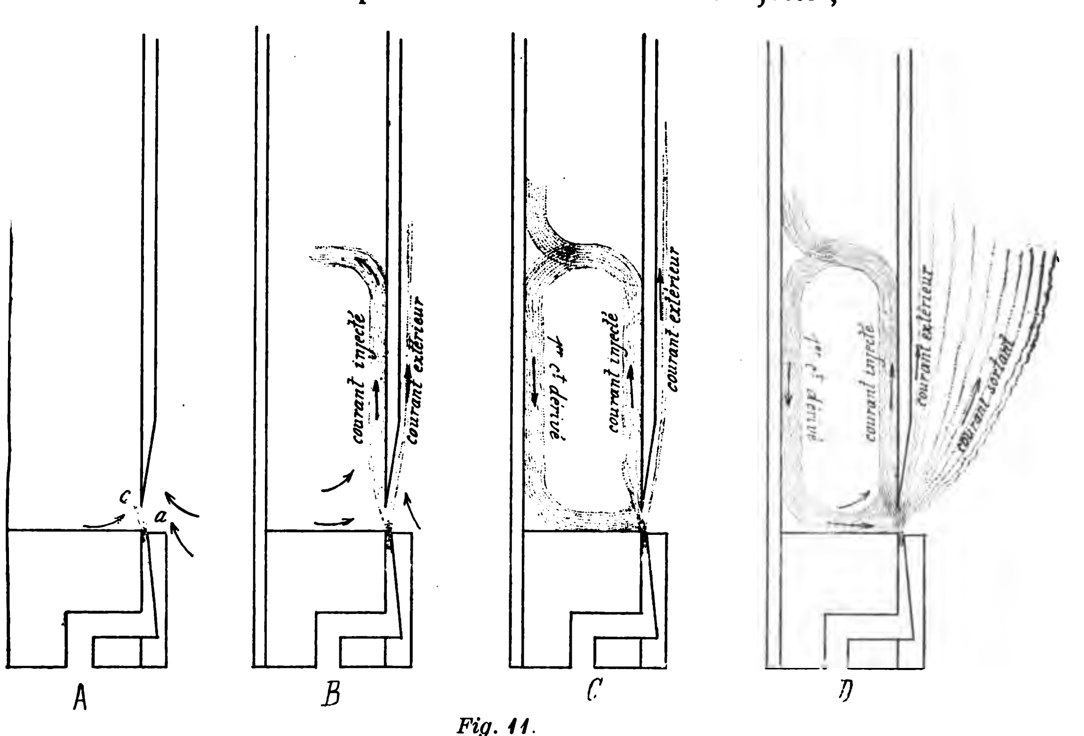


Fig. 11.

celui-ci, en quittant la paroi, a provoqué un deuxième courant d'entraînement dans l'espace où se formera le deuxième cyclone. Le courant extérieur a pris naissance en même temps que le courant injecté.

Les flèches isolées indiquent les courants accessoires.

Troisième phase. — Le courant injecté se bifurque avant d'atteindre la paroi postérieure (fig. 11, C). Une partie, que nous avons nommée branche ascendante, monte le long de la paroi. La partie inférieure, ou premier courant

dérivé, descend, longe la paroi et le fond du tuyau, et atteint enfin le courant initial.

La condensation produite par l'invasion du courant initial, a atteint une hauteur qu'il est difficile, sinon impossible, de déterminer expérimentalement.

Quatrième phase. — Le courant dérivé, qui devient le *courant sortant*, traverse le courant initial et le fait fléchir au dehors (fig. 11, D). Il a besoin, pour ce travail, d'une force convenable : cette force, il la doit à l'énergie de l'appel exercé par la raréfaction produite au fond du tuyau pendant la première phase.

Le courant extérieur gagne en volume et en force. Le courant injecté perd tout ce que le précédent gagne.

Le courant extérieur et le courant sortant sont, à la vue, confondus dans la plupart des tuyaux ; ils montent de concert le long de la paroi et prennent un développement qui dépasse la section transversale du tuyau. Il y en a cependant où l'on peut distinguer l'un des courants de l'autre. Cela tient à des causes que je ne détaillerai pas ici, parce que ces courants n'ont pas d'influence sur la formation ou, plutôt, sur la mise en vibration du son le plus bas émis par le tuyau.

La saillie du courant dérivé, la déviation du courant initial vers l'extérieur et la diminution du courant injecté qui en résulte, ont amené, au bas du tuyau, une raréfaction qui se propage à la suite de l'onde condensée qui l'a précédée. C'est une onde raréfiée, qui se propage à la suite de l'onde condensée.

Cinquième phase.—L'affaiblissement du courant dérivé, que nous avons constaté dans la phase précédente, permet au courant initial de reprendre, ou à peu près, la direction qu'il avait dans la troisième phase. Le courant extérieur perd le volume et la force que la saillie du courant sortant lui avait prêtés. Ce volume et cette force sont

restitués au courant injecté et, par lui, au courant dérivé ; c'est une condensation équivalente à la précédente, qui succède à la première raréfaction. C'est donc une deuxième onde condensée qui se propage à la suite de la première onde raréfiée.

L'effet de la troisième phase est le même que celui de la cinquième. Cet effet et celui de la quatrième se reproduisent et se succèdent alternativement, et déterminent la hauteur du son le plus bas qu'émet le tuyau.

Expériences. — L'intermittence du premier courant dérivé se trahit par les ondulations du courant sortant ; on les observe sans intermédiaire, à cause de leur mouvement de progression.

Il n'en est pas de même du balancement, du mouvement de va-et-vient du courant initial. Une flamme maintenue devant la bouche empiète sur la colonne aérienne ; dans un tuyau ouvert, on la voit en regardant par le haut, ou par la paroi latérale si elle est transparente. Pour les tuyaux bouchés, il faut une paroi ou un tampon transparents. La fréquence des vibrations ou, ce qui revient au même, des entrées et des sorties, donne l'impression d'une flamme continue. Le miroir tournant fait voir des protubérances ou éminences analogues à celles qu'on voit dans les flammes manométriques de Kœnig.

Une flamme fuligineuse, produite par trois brins de bougie tordus ensemble, a donné de bons résultats. La flamme placée devant la bouche donne une bande plus ou moins lumineuse, d'après l'emplacement choisi pour la regarder par réflexion ; ses invasions se traduisent par des éminences plus éclatantes. Ces éminences, comme les ondulations du courant sortant, se rapprochent quand le son monte et s'écartent quand il baisse.

Chose remarquable : la flamme rase la lèvre supérieure, qui est *en bois*, et malgré cela, dans beaucoup de tuyaux, les lèvres sortent indemnes de l'expérience ; d'autres sont plus ou moins noircies ; très peu, légèrement carbonisées.

L'expérience suivante mérite d'être signalée, parce qu'elle peut être faite avec des tuyaux ordinaires.

On pose sur la lumière une boule en verre soufflé, comme un grain de raisin artificiel sans appendice ; puis on ouvre lentement la soupape au moyen de la touche filetée ; la boule paraît se suspendre à la lèvre supérieure, puis commence à se balancer de côté et d'autre. Le courant devenant de plus en plus fort, elle se détache, entre et sort par la bouche, montant et descendant sans toucher le tuyau, excepté pour frapper parfois la lèvre à l'intérieur et à l'extérieur, un peu au-dessus de la bouche.

Si la boule tombe trop fréquemment, c'est parce que le courant initial est dirigé trop en dedans ou trop en dehors pour la bonne réussite.

Tuyaux à deux bouches. — On trouve dans quelques orgues un jeu de *flûte double* (1). Les tuyaux de ce jeu ont deux bouches opposées l'une à l'autre. Des cyclones très réduits se partagent l'espace. On peut s'en assurer, en y introduisant une petite plume qui tournoie tantôt devant l'une, tantôt devant l'autre bouche : à chaque déplacement, elle décrit un chiffre huit couché horizontalement, ∞ .

Une des lumières étant bouchée, le tuyau ne parle que par une seule bouche ; un courant d'entraînement entre par l'autre et semble devoir nuire à la formation du cyclone. Il n'en est pas ainsi ; ce courant, quoiqu'il soit de faible densité, n'en suscite pas moins un autre, par aspiration, au-dessus de la bouche qui lui donne entrée et fait appel au premier courant dérivé. Quand le tuyau parle avec un courant *de fumée,* on voit le courant *d'air* qui entre par la bouche muette longer le fond ; il est nettement séparé du courant dérivé.

Direction anormale du biseau. — Comme nous l'avons vu dans les expériences préliminaires (n° 8), l'angle que fait le biseau de la lèvre supérieure avec la paroi de face

(1) Hamel, *Manuel du facteur d'orgues*, t. III, p. 531.

peut être tel qu'il permette au courant de suivre sa direction en quittant la paroi. Les deux tuyaux suivants montrent une application de cette propriété.

1° Un tuyau ouvert en sapin a pour dimensions $0^m,62 \times 75^{mm} \times 50^{mm}$; la lèvre inférieure *f* (fig. 12) est mobile ; l'épaisseur des parois est de 16^{mm} ; le biseau fait un angle de 80° avec le côté extérieur de la paroi de face.

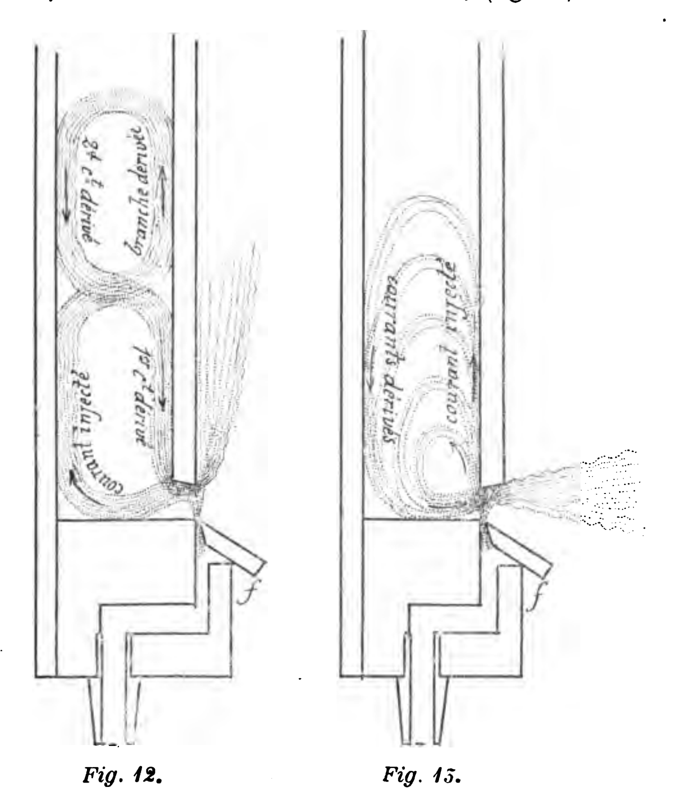


Fig. 12. *Fig. 13.*

Le courant extérieur longe la paroi ; le courant injecté ***s'en éloigne***, longe le fond, se relève, longe en montant la paroi postérieure, etc.

Les cyclones se forment en sens inverse de ceux que nous avons observés jusqu'ici ; le premier monte à 14 ou 15^{cm}, le second à 27^{cm} environ. Les courants extérieur et

sortant sont peu développés, parce que le courant initial et le courant dérivé se rencontrent dans des directions diamétralement opposées et que le courant dérivé doit, pour saillir, s'infléchir de 90° à 100°.

2° Voici un tuyau identique, à part la direction du biseau, dont l'angle aigu est à l'intérieur (fig. 13). Le courant extérieur s'éloigne perpendiculairement de la paroi, ce qui contribue à la raréfaction au fond du tuyau. Un courant d'entraînement descend le long de la paroi de face à l'extérieur. Le courant injecté monte le long de cette paroi à l'intérieur. La raréfaction au fond du tuyau est poussée si loin, que le courant injecté dérive cinq ou six fois vers le bas. L'espace entre les branches n'est visible que pendant quelques moments. Le cyclone est envahi tout de suite par la fumée. Il s'élève à environ 24 centimètres de hauteur. Dans aucun de ces tuyaux, il ne s'est formé un deuxième cyclone.

Les courants extérieur et sortant prennent, en jaillissant, au contact de la lèvre supérieure, la moitié de la hauteur de la bouche. Ils comprennent entre eux un angle de 25° environ, angle dont la bissectrice est à peu près perpendiculaire à la paroi. Des deux côtés, il y a de petites éminences moins saillantes que dans les tuyaux normaux. Un faible courant d'entraînement, provoqué par le courant initial, s'insinue entre les courants et la lèvre inférieure.

La direction des biseaux n'a pas eu d'influence sur la hauteur du son. Tous les deux donnaient le *sol* de l'octave d'un tuyau de quatre pieds. Le peu de discordance qu'il y avait entre eux n'excédait pas celle de deux tuyaux normaux identiques sortant des mains de l'ouvrier.

Le son de ces tuyaux se rapproche du bourdon. Quand le second a le biseau coupé à angle droit, il parle encore, mais le son y perd au point de vue musical.

Tuyaux pyramidaux. — Ce sont des tuyaux sonores bouchés, dont la longueur, par rapport à leur section à

la hauteur de la bouche, est celle des tuyaux normaux. Ce qui les en distingue, c'est qu'ils se terminent en pointe.

Les cyclones s'y forment régulièrement, sans rien présenter de remarquable. Mais on observe une particularité que je signale en passant. Les tuyaux entièrement pyramidaux ou coniques donnent les harmoniques des tuyaux ouverts, de même qu'ils donnent sensiblement, comme son fondamental, l'unisson du tuyau ouvert de même longueur. Mais, si la partie inférieure est prismatique et la partie supérieure seule pyramidale, le tuyau donne les harmoniques d'un tuyau bouché.

Tuyaux courts. — Dans les tuyaux ouverts très courts, il se forme parfois des cyclones qui en dépassent le sommet. Il suffira d'en citer deux.

1° Longueur $0^{m},15$; section transversale, $40^{mm} \times 40^{mm}$. Il s'y forme un cyclone qui dépasse le sommet.

2° Un deuxième, encore plus hors de proportion, ayant $0^{m},115 \times 70^{mm} \times 51^{mm}$, a donné deux cyclones. Le deuxième dépassait le sommet. Les courants extérieurs étaient extraordinairement développés.

INSTRUMENTS ET APPAREILS DIVERS

Excepté pour les tuyaux courts, nous ne nous sommes guère écarté jusqu'ici des tuyaux classiques, soit pour les dimensions, soit pour l'alimentation. La direction des biseaux n'est anormale dans deux des spécimens qu'à cause de l'épaisseur des parois, qui a été exagérée à dessein, en vue de la confirmation d'un principe. Cette direction est normale dans les tuyaux métalliques, où le développement du courant initial, à la hauteur de la lèvre, dépasse l'épaisseur de la paroi.

Avant de parler des tuyaux *anormaux*, nous passerons en revue quelques instruments qui sont sonores au même

titre que les tuyaux normaux, parce que la formation du son y est soumise aux mêmes lois.

Flageolet. — La seule différence entre un tuyau et un flageolet est que celui-ci peut donner toute une gamme. Le tuyau ne donne qu'une note fixe; mais il peut donner la même gamme, si on le perce convenablement.

Sifflet. — Malgré ce qu'on en dit, le sifflet peut être rangé parmi les tuyaux sonores, puisque, parmi ceux-ci, il y en a dans les orgues qui ne dépassent pas ses dimensions.

Flûte traversière. — Cette flûte a été représentée par un tuyau de $1^m,50 \times 53^{mm} \times 50^{mm}$, percé à l'instar d'une flûte et muni d'un plateau percé d'un trou correspondant à l'embouchure, qui est ronde. Il porte une chambre mobile à lèvre mobile ; l'ensemble peut tourner de manière à lancer le courant initial dans toutes les directions.

Quels que soient la direction du courant et le nombre de trous bouchés, le tuyau parle. La chambre et la lèvre mobiles sont de rigueur, pour faire varier l'ouverture de la bouche, l'inclinaison et le volume du courant initial; le sommier à courants variables de même, pour en régler la force. Il se forme un cyclone, parfois deux. Les courants extérieur et sortant sont bien développés.

Tuyaux cubiques et carrés. — L'observation des cyclones dans les tuyaux cubiques est moins facile que dans les tuyaux carrés, qui n'en diffèrent que par le rapprochement des parois latérales. Ceux-ci ont donc été préférés pour les expériences suivantes, bien qu'on n'ait pas négligé les autres.

Tuyau carré de 188^{mm} de côté, écartement des parois latérales, en verre à vitres ordinaire, 23^{mm} ; deux bouches opposées à fleur de fond, larges de 17^{mm}, hautes de 18^{mm}; des chambres mobiles permettent de les réduire ou de les fermer à volonté. On peut aussi les retourner bout pour bout, afin de lancer le courant dans une direction opposée.

Une seule bouche étant ouverte, il se forme un cyclone. Tout l'intérieur est en mouvement circulaire, mais la partie centrale est en retard sur la partie extérieure au cyclone, qu'on n'en distingue guère.

Quand on ouvre la deuxième bouche pendant que le tuyau parle, le mouvement s'accélère un peu, et un courant passe par cette ouverture.

Quand on fait parler le tuyau par les deux bouches à la fois, et que les deux courants injectés se dirigent vers le haut, deux petits cyclones se forment près des bouches. Un tourbillonnement paisible se forme entre les deux.

Lorsqu'une des chambres est tournée de façon que les courants injectés s'avancent de concert, il se forme un seul cyclone; on distingue le noyau qui se réduit à peu de chose. Il est aussi affecté d'un mouvement giratoire.

Tuyaux cubiques. — Dans les tuyaux cubiques, pour autant qu'on peut le distinguer dans la grande masse de fumée, les phénomènes ne diffèrent pas des précédents, mais tout se passe avec plus de vigueur. De là, le recours aux tuyaux carrés, surtout pour l'application à un autre instrument, le sifflet à vapeur, dont il sera parlé plus loin.

Tuyaux circulaires. — Tuyau circulaire à parois latérales en verre (fig. 14); diamètre $0^m,40$; écartement des glaces 50^{mm}. Deux bouches, diamétralement opposées, peuvent être réduites ou fermées par des chambres mobiles à lèvre mobile, au moyen de pignons qui les traversent et engrènent dans des crémaillères fixées sur le tuyau. Les chambres peuvent être renversées, pour lancer le courant en sens inverse.

1° *Tuyau circulaire à une bouche.* Le développement du courant injecté dépend de la largeur de la lumière et de la position de la lèvre inférieure, qui donne la direction au courant initial. Dans la présente expérience, la largeur du cyclone est de 3 à 4^{cm}. L'espace circonscrit, le *noyau*, est envahi peu à peu par des bandes très claires

de fumée, qui perdent bientôt leur mouvement de translation et forment paisiblement des dessins, des volutes dans le noyau, comme dans un espace tranquille, sauf qu'elles sont affectées d'une légère agitation, due à la vibration des parois.

Quand on fait succéder sans interruption un courant d'air au courant de fumée, la fumée du cyclone est vite expulsée ; on voit, entre lui et le noyau, une zone moins large, formée en partie de l'air qu'il abandonne et en partie de la fumée qui sort du noyau en bandes irrégulières et peu fournies. Le mouvement de translation de



Fig. 14.

ces bandes est très modéré. Elles sont absorbées par le cyclone. La densité des figures dans le noyau diminue lentement, mais elles persistent sans autre altération, et finissent par disparaître sans commotion.

L'envahissement du noyau par le cyclone, accusé par la fumée dans le cas précédent, et l'affaiblissement des figures dans le cas présent, font voir qu'il y a un échange continu entre le noyau et le cyclone ; celui-ci restitue l'air qu'il entraîne. C'est ce qui se passe probablement dans tous les cas où ces deux éléments ne se confondent pas, comme il arrive dans les instruments très réduits.

2° Même tuyau. On fait passer dans le tuyau une plume lisse très convexe, plus petite que l'écartement des parois ; elle est entraînée par les courants et tombe fréquemment à travers le noyau.

Quand elle tombe le côté convexe en bas, elle flotte à demeure sur le courant. Elle monte à une hauteur qui est en rapport avec la vitesse du courant et sa propre gravité, qui lui sert d'ancre. C'est mieux qu'une nacelle ancrée dans un courant ; elle est affectée d'un frémissement qui la fait ressembler à un être vivant, surtout si ses bords ne sont pas rigides.

Quand on tourne le tuyau dans le plan de ses parois planes, la plume ne suit pas le mouvement ; le passage de la bouche la laisse à peu près indifférente.

Le courant extérieur confirme une des expériences préliminaires (n° 10) ; il rencontre un pan coupé *a*, flanqué de deux parois ; il s'y applique, le suit, rencontre de nouveau un angle de 45°, s'y applique de même et le suit jusqu'à épuisement de force. C'est ce qu'il fait aussi, à plus forte raison, quand l'extérieur est arrondi comme l'intérieur.

3° *Tuyau circulaire à deux bouches* (même fig.). Quand ce tuyau parle par ses deux bouches et que les courants injectés s'avancent de concert, ils se renforcent, et tout se passe à peu près comme dans les expériences précédentes, mais avec plus de vigueur.

4° Quand les courants injectés se rencontrent — par une disposition convenable des chambres — ils se partagent l'espace et forment deux cyclones qui s'avancent en sens inverse ; une colonne de fumée traverse le milieu du tuyau, si les courants sont de même force ; sinon, le plus fort empiète sur l'espace du plus faible. Une plume n'y flotte pas pour ainsi dire, et passe fréquemment d'un cyclone à l'autre.

Dans les tuyaux circulaires, quel que fût le son le plus bas, il ne s'est montré de dérivation que dans le cas pré-

cédent. Dans les autres cas, le courant dérivé ne s'est jamais écarté de la paroi.

Voici comment on peut observer — plus ou moins bien — les cyclones dans tout tuyau à parois transparentes. On dépose une plume sur le fond, ou on la laisse tomber par le haut, s'il n'y a pas de courant de dégagement. S'il y en a un, on peut aussi y laisser tomber une plume et ne faire parler le tuyau que lorsqu'elle est arrivée à portée du deuxième cyclone. L'inconvénient est que la plume s'accroche fréquemment à la lèvre ; parfois, elle est lancée dehors.

De petites vessies natatoires rendent à peu près les mêmes services, sans présenter le même inconvénient. Si elles s'arrêtent devant la bouche, elles sont faciles à repousser et n'en sortent pas. On réussit mieux en mettant dans le recoin où le fond rejoint la paroi postérieure, un peu de fine sciure de bois. Au besoin, on amène cette sciure dans la zone d'action du courant dérivé au moyen d'un fil de fer recourbé, passé par la bouche, ce qui ne gêne en rien l'expérience.

Sifflets à vapeur. — Parmi ces sifflets, il y a des cylindres dont la longueur peut atteindre une à plusieurs fois le diamètre. Ils sont fermés à un bout. L'extrémité ouverte est fixée en regard d'une lumière. La bouche est ouverte sur tout le pourtour, mais la lumière est parfois divisée en plusieurs sections.

D'autres sont des portions de sphère, montées dans les mêmes conditions.

Le tuyau carré précédent et les tuyaux bouchés à deux embouchures donnent une tranche médiane des sifflets cylindriques.

Un tuyau circulaire, coupé à la hauteur des lumières et garni d'un fond, donne une tranche médiane des sifflets hémisphériques. Il s'y forme deux cyclones, comme dans les tuyaux carrés.

D'après cela, il se forme dans les sifflets à vapeur des

cyclones annulaires, si la lumière prend tout le pourtour. Si la lumière est divisée, il s'y forme autant de cyclones qu'il y a de sections.

Tuyau à fond mobile. — Le fond est le principal obstacle à l'affluence de l'air dans les tuyaux. Le tuyau à fond mobile permet d'étudier l'influence de cette partie de l'appareil.

Un tuyau sonore de $1^{m},16 \times 86^{mm} \times 60^{mm}$ est coupé à la hauteur du fond (fig. 15). Une chambre, où l'on fixe un porte-vent, est attachée par deux pivots à deux bras *a*, *a*, pouvant glisser sur la paroi de face. Pour



Fig. 15.

modifier la direction du courant initial, on peut faire tourner la chambre, au moyen de deux pitons *d*, *d'*, réunis par un cordon qui s'enroule sur *d*. Les deux bras mobiles permettent de faire varier la hauteur de la bouche. Enfin la lèvre inférieure est mobile pour régler l'ouverture de la lumière. Le fond mobile est une glace *p*, qui peut glisser entre deux coulisses. Le tuyau est placé horizontalement.

1° *Tuyau ouvert à fond mobile.* Quand le fond est écarté, le courant initial et le courant d'entraînement, qui entre par le bas, passent librement et se dégagent par le sommet, quelles que soient la distance de la chambre (ou la hauteur de la bouche), la direction et la force du courant initial. Aucun son musical ne se produit. On entend bien le bruissement de l'air qui s'échappe de la lumière, ainsi qu'un sifflement sur la lèvre supérieure ; mais le

tuyau ne parle pas par résonnance. Il ne s'empare pas, comme on l'a supposé, d'un des sons contenus dans le bruissement pour le renforcer. Le courant extérieur est aplati sur la paroi de face.

Quand on avance lentement le fond pour réduire l'ouverture, un tourbillonnement commence à se faire dans le recoin, mais il ne traverse pas le courant initial : il est entraîné par le courant injecté. Quand l'ouverture est assez réduite, les cyclones se forment. Le courant dérivé traverse le courant initial ; le courant extérieur et le courant sortant prennent un grand développement, et le son éclate. Cela arrive, avant même que le fond ait masqué totalement l'ouverture nuisible.

La distance entre le fond et la chambre, au moment où éclate le son, varie d'un tuyau à l'autre. Elle varie encore, pour le même tuyau, d'après la force et la direction du courant et l'écartement de la chambre — ou la hauteur de la bouche. Le son est d'abord, musicalement parlant, de mauvaise qualité ; il gagne à mesure que le fond avance et que l'ouverture nuisible diminue. Chose remarquable : il est plus harmonieux (mais plus élevé) quand il reste encore une petite ouverture que lorsqu'il n'y en a plus. Ceci est une question de timbre ; je ne la signale qu'en passant.

2° *Le même tuyau bouché.* De même que dans l'expérience précédente, quand le fond est écarté, le courant extérieur est aplati sur la paroi de face. Le courant injecté n'a d'autre issue que l'ouverture laissée libre par le fond. Il s'avance jusqu'à une distance qui varie d'un tuyau à un autre, se détourne, et revient en longeant la paroi postérieure. Ce courant de retour reste distinct du courant injecté ; il ne dévie pas de sa direction.

En avançant le fond, tout se passe à peu près comme ci-dessus.

3° Les tuyaux précédents étant coupés à la hauteur du fond, la bouche n'était pas enlevée, et le fond joignait la

chambre. D'autres étaient coupés à la lèvre supérieure : le fond mobile pouvait donc aller la joindre et fermer le tuyau. Dans ce cas, l'ouverture, que tantôt je nommais nuisible, était nécessaire pour laisser passer le courant initial et le courant dérivé.

Tuyau à fond incliné. — Les dimensions de ce tuyau sont $0^m,70 \times 65^{mm} \times 42^{mm}$; le fond fait, avec la paroi de face, un angle de 45° ; la bouche a 36^{mm} de large ; les deux lèvres sont mobiles (fig. 16).

Lorsqu'on abaisse *lentement* la touche, tout le courant initial est injecté. Il longe le fond sans se diviser et sans faire cloison dans la bouche, qui reste en libre communication avec l'air extérieur ; il monte le long de la paroi postérieure, et la dérivation se fait vers la paroi de face. Le premier courant dérivé va se perdre vers le milieu du fond, où il se fait une grande agitation. Toute la fumée sort par le haut du tuyau.

Je nommerai *tourbillons* les courants giratoires dont les courants dérivés ne traversent pas le courant initial ou le traversent sans intermittence.

Le premier tourbillon monte à 19^{cm} environ de la lumière ; au-dessus du premier, il s'en forme un second, mesurant environ 9^{cm}.

Un fort courant d'entraînement entre par la bouche.

Tout son musical fait défaut ; il n'y a que le bruissement à la lumière.

Quand on abaisse *vivement* la touche, le courant, s'élançant vivement franchit la bouche pendant un instant. Cela suffit pour produire un son musical appréciable ; une petite quantité de fumée a été projetée. Puis le courant initial s'applique sur le fond, et tout se passe comme dans l'expérience précédente.

Si l'on attache au milieu du fond une minime touffe de duvet, elle exécute, pendant le premier instant, un mouvement vers la bouche. Après ce mouvement, qui ne dure qu'un clin d'œil, elle prend la direction opposée.

Certains tuyaux de cette construction dont les parois latérales sont très rapprochées, par exemple $0^{m},65 \times 60^{mm} \times 15^{mm}$, peuvent parler d'une manière continue avec un courant excessivement faible.

Le même tuyau, étant bouché, parle. Il s'y forme un seul cyclone, de 10^{cm} environ. Le courant dérivé sort

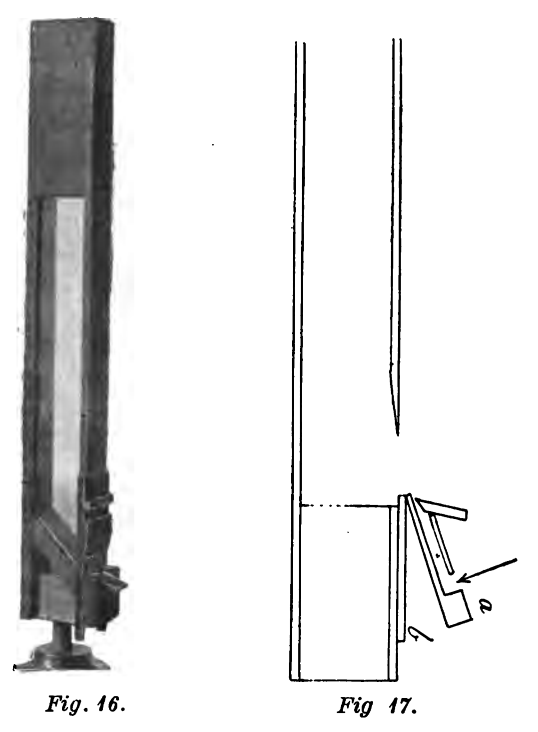


Fig. 16. *Fig 17.*

sur toute la hauteur de la bouche, qui est de 23^{mm}. Le courant sortant fait avec la paroi un angle de 80°. L'espace compris entre le courant sortant et le courant extérieur, est moins chargé de fumée que les limites extérieures de ces mêmes courants.

Les tuyaux de ce genre, ouverts ou fermés, parlent lorsque la moitié du fond est coupée à angle droit, la division allant de la lumière à la paroi postérieure. Dans ce cas, les cyclones se forment comme dans les tuyaux de construction normale.

Tuyau où tout le courant est injecté et dont aucun courant ne sort par la bouche. — Il s'est présenté un tuyau exceptionnel, présentant des phénomènes qui semblent ne pas concorder avec ceux qui ont été observés précédemment.

C'était un tuyau sonore, en sapin compact ; dimensions $2^{m},55 \times 127^{mm} \times 85^{mm}$; épaisseur des parois 16^{mm}. Une chambre à pivots *a* (fig. 17) et à lèvre mobile, tourne sur une planchette *b*, qui peut glisser entre deux coulisses. Un mécanisme permet de déplacer la planchette pour faire varier la hauteur de la bouche. On peut aussi donner à la chambre et, par suite, au courant initial, l'inclinaison voulue vers l'intérieur du tuyau. Le tuyau est placé horizontalement.

En dirigeant le courant tout à fait à l'intérieur du tuyau, *pendant qu'il parlait,* un fort courant d'entraînement y passait ; mais rien ne sortait par la bouche, sauf que, très rarement, un petit globule de fumée, irrégulier et gros comme un pois, *s'élançait* au dehors pour *éclater* à petite distance, 6 à 8^{cm} environ. Les débris étaient entraînés vers l'intérieur du tuyau par le courant d'entraînement. Ce dernier fait ne s'est présenté qu'une demi-douzaine de fois. Il est très remarquable ; peut-être y aurait-il quelque lumière à en tirer que nous n'apercevons pas présentement.

Plusieurs tuyaux de $0^{m},50$ à un mètre, et un pareil au précédent, construits à dessein pour voir si la dimension y était pour quelque chose, ont toujours expulsé une partie des courants par la bouche, ou, du moins, chassaient des grains de sable fin déposés sur la lèvre supérieure.

Que se passe-t-il dans ces tuyaux ? Comme ils n'étaient pas vitrés, nous en sommes malheureusement réduits aux conjectures.

Solution conjecturale. — Le courant injecté comprend le courant initial ; sa densité est supérieure à celle de la colonne aérienne et du milieu ; il passe à distance de la

lèvre et de la paroi. Un courant d'entraînement, moins dense que la colonne et le milieu, s'insinue entre les deux. De là préparation de la *première demi-onde dilatée.*

Le courant dérivé traverse et fait fléchir le courant injecté, ce qui ferme le passage au courant d'entraînement ; l'exclusion de ce courant produit une raréfaction : d'où *la première demi-onde dilatée.*

L'arrêt du courant d'entraînement produit un choc sur la partie du courant injecté qui n'est pas protégée par la paroi ; celui-ci reprend sa direction première et ouvre de nouveau le passage au courant d'entraînement : d'où *la deuxième demi-onde condensée.*

Le courant d'entraînement a repris son allure première et permet au courant dérivé de repousser de nouveau le courant injecté. Une nouvelle exclusion provoque *la deuxième demi-onde dilatée.*

Ce serait donc l'invasion et l'exclusion alternative du courant d'entraînement, qui produirait la condensation et la dilatation de la colonne aérienne.

Il est plus que probable que, dans les tuyaux où tout le courant initial était injecté, le son se formait de même, malgré la petite quantité d'air expulsée.

Tuyau sans fond ni tampon. — Ce tuyau, ainsi qu'un appeau sans parois latérales, doit être classé à part, parce que les cyclones ne s'y forment pas comme ceux qui ont été observés jusqu'ici.

1° *Tuyau ouvert aux deux bouts.* Dimensions $1^{m},03 \times 95^{mm} \times 30^{mm}$; hauteur de la bouche 30^{mm}, réduite à 20^{mm} par la chambre, mobile entre deux coulisses (fig. 18). Un faux pied sert à le fixer horizontalement. En le faisant parler avec un courant de fumée, on voit ce qui se passe dans la partie qui livre passage au courant injecté, et que je nommerai partie supérieure. En le faisant parler avec un courant d'air, on peut voir ce qui se passe à la partie inférieure : il suffit pour cela de lancer un courant de

fumée à une distance et dans une direction telles qu'elle ne puisse entrer dans le tuyau que par entraînement.

Le courant injecté longe la paroi de face et se développe en courbe vers la paroi postérieure. Par l'extrémité opposée, il entre un courant d'entraînement de même section que l'ouverture. Ce courant se dirige en totalité vers la bouche; il dérive et décrit une courbe, de même forme à peu près que celle du courant injecté. Dans l'aire *a*, il n'y a pas de mouvement visible, sauf parfois pour une petite portion de fumée, abandonnée par le courant injecté. Elle tournoie très lentement et finit par être entraînée.

Une partie de l'air ou de la fumée du courant accessoire

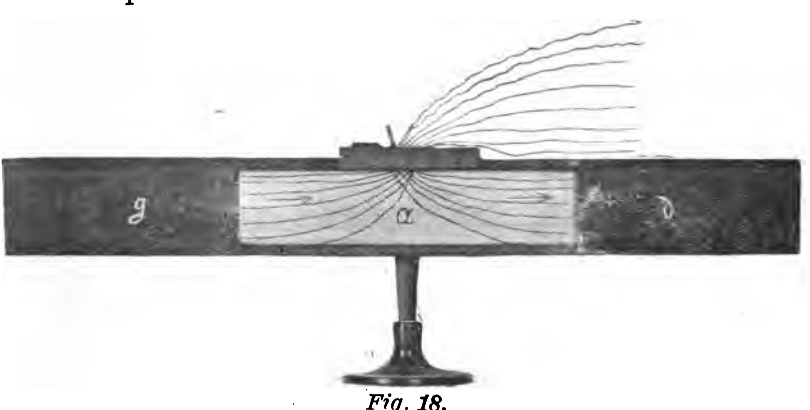


Fig. 18.

est expulsée par la partie supérieure; l'autre, par la bouche à travers le courant initial.

Le courant sortant prend la moitié de la hauteur de la bouche au contact de la lèvre supérieure; il est très développé.

Nous trouvons dans ce tuyau, le *courant initial* et le *courant injecté* qui en provient : ils suscitent un courant d'*entraînement* qui va, par intermittence, traverser le courant générateur près de son origine : c'est le *courant dérivé* et le *courant sortant* des tuyaux normaux. Nous avons donc là ce que je crois pouvoir appeler un cyclone ouvert.

Les tuyaux de cette espèce parlent aussi bien que les meilleurs *tuyaux sonores*. Encore n'est-il pas nécessaire que la bouche soit au milieu ; on peut la rapprocher d'une des extrémités jusqu'au delà du quart de la longueur du tuyau.

De même que pour les tuyaux de construction normale, on étouffe le son quand on met obstacle à la vibration des parois.

2° ***Tuyau sans fond, bouché à un bout.*** On voit sur la fig. 19, que l'ouverture de la bouche du tuyau est coupée, du côté gauche, à angle aigu comme les lèvres des tuyaux normaux. A droite, en *d*, elle est coupée à angle droit, et c'est de ce côté que la chambre était appliquée dans l'expérience précédente : le courant initial allait donc donner sur l'arête de la lèvre, comme dans les tuyaux normaux (1).

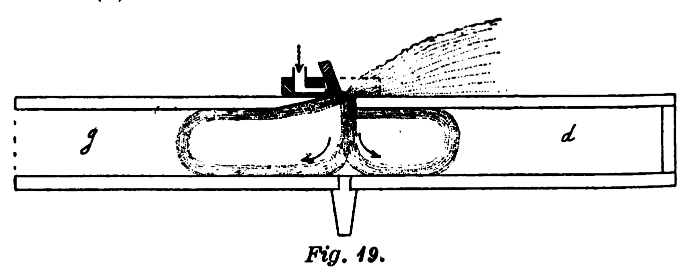


Fig. 19.

Dans l'expérience actuelle, l'extrémité du tuyau est bouchée du côté où la paroi de la bouche est coupée à angle droit. La chambre, retournée bout pour bout, est placée de l'autre côté de la bouche. La section à angle droit est ainsi devenue la lèvre supérieure ; le courant injecté, suivant cette direction, s'avance donc directement vers la paroi postérieure. Il s'ensuit qu'il se forme deux courants par entraînement, deux courants dérivés et deux cyclones qui tournent en sens inverse l'un de l'autre. Cet

(1) Pour correspondre à la fig. 18, le tuyau de la fig. 19 devrait pivoter d'un demi-tour autour de son pied.

ensemble de faits ne s'est présenté que dans des cas dont il n'a pas été fait mention, et aussi dans les tuyaux circulaires à deux bouches où les courants injectés se rencontraient.

Le cyclone du côté bouché n'avait, à très peu près, que la moitié du développement de celui du côté ouvert. On doit l'attribuer à la résistance plus grande que le courant dérivé avait à vaincre dans un espace fermé dont il augmentait la densité. Il s'y fait en outre une réflexion, une réaction qui ne se produit pas du côté ouvert.

Le courant dérivé prenait pour saillir toute l'ouverture de la bouche, depuis la lumière jusqu'à la lèvre.

Flûte de Pan. — Dans tous les instruments que nous avons passés en revue, à une exception près, le courant initial, qui s'étale en éventail, est lancé de manière que la direction d'un de ses rayons soit celle de la paroi. La flûte de Pan, et tous les instruments où cette direction doit être perpendiculaire à la paroi, forment un groupe à part. Ils exigent notre attention, parce qu'ils sont compris dans la définition du tuyau sonore. Il suffira de constater brièvement qu'il s'y forme des cyclones.

Flûte de Pan ouverte. Dans un cylindre de verre convenablement embouché, ayant une longueur de 250^{mm} et un diamètre de 50^{mm}, il s'est formé un cyclone qui le dépassait de un à deux centimètres.

Flûte de Pan bouchée. Un cylindre de même diamètre et de 420^{mm} de longueur, a présenté un cyclone de 170^{mm} environ.

Les courants extérieur et sortant ont présenté les mêmes caractères que ceux des tuyaux sonores.

Des cylindres de dimensions diverses, ouverts ou bouchés, des bouteilles, des bocaux, etc., ont donné des résultats analogues. Là où la transparence faisait défaut, le développement et l'ondulation des courants accusaient la présence de cyclones. Au point où nous en sommes, il n'y a pas de témérité à l'admettre.

Pour emboucher les tubes, bocaux, bouteilles, etc., qui ne servent que transitoirement, il suffit d'en couvrir convenablement l'ouverture avec une chambre à lèvre mobile. L'expérience est facile ; on tient l'instrument d'une main et la chambre de l'autre.

Il arrive que des bouteilles, des vases, etc., exposés à l'air, parlent sous l'influence du vent, de même que parfois une cheminée *hurle* par un temps d'orage. Il se peut aussi qu'une cavité naturelle rendeun son dans les mêmes circonstances. Peut-on douter que des cyclones s'y forment, comme dans tous les instruments que nous avons passés en revue ?

INFLUENCE DES PAROIS

« Lorsque les tuyaux ont leurs parois suffisamment résistantes, c'est la colonne d'air qui est seule le corps sonore ; que les parois soient de bois, de cristal ou de plomb, le timbre seul est modifié. » Ainsi s'expriment, avec des variantes de détail, bon nombre de traités d'acoustique.

On pourrait relever, dans ces affirmations, une contradiction assez manifeste. En effet, d'après les mêmes traités, les timbres sont caractérisés par le nombre et la hauteur des sons partiels, ainsi que par les rapports entre les intensités de ces sons. Si donc les parois modifient le timbre, il faut qu'elles produisent une addition ou une soustraction de sons partiels ou qu'elles changent leurs rapports d'intensité. Or, toutes choses restant les mêmes, on ne voit pas comment les sons partiels pourraient changer par la simple *présence* de tel corps au lieu de tel autre, si ces corps n'exercent aucune action, ne font aucun travail.

C'est donc, à mon avis, une erreur, d'attribuer principalement le timbre à la matière des parois. Dans ce cas,

en effet, il faudrait autant de matières différentes qu'il y a de timbres différents. Or, on peut obtenir presque tous les timbres avec une même matière, en faisant varier, par exemple, la taille, la hauteur des bouches, la force du vent, la forme et les dimensions du pavillon, etc.

Je crois, au contraire, qu'il faut attribuer aux parois un rôle important dans la formation même du son. Pour procéder avec ordre, je commencerai par exposer les faits qui prouvent, selon moi, la réalité de cette influence des parois. J'indiquerai ensuite ceux qui pourront contribuer à préciser la nature de cette influence.

Les faits principaux qui prouvent la réalité de l'influence des parois sur la formation du son, peuvent se classer en quatre groupes. Ces groupes nous sont fournis par les tuyaux à parois faibles, par ceux qui sont sensibles à la percussion, par les tuyaux jumeaux à paroi commune et par les tuyaux tardifs.

Tuyaux à parois faibles. — J'appellerai *parois rigides* celles qui n'ont pas d'influence sur le son lorsqu'elles subissent une gêne quelconque, une pression, par exemple, s'opposant à leur libre vibration. Cette vibration n'est peut-être que moléculaire, sans déplacement sensible, ou, s'il y en a, la rigidité des parois est telle que ce déplacement n'est appréciable que par le toucher, et aussi probablement par des instruments plus délicats que ceux qui ont été employés.

Les *parois faibles* sont celles qui ont de l'influence sur le son, quand elles subissent une gêne quelconque qui s'oppose à leur libre vibration.

Les phénomènes observés dans les tuyaux sonores doivent aussi se produire dans ceux dont les parois sont faibles. Quoiqu'on n'en puisse guère douter, la vérification expérimentale en a cependant été faite. J'ai employé notamment dans ce but des tuyaux de dimensions assez

grandes, au point que non seulement la compression des parois (en verre à vitres) faisait varier la hauteur et le timbre du son, mais qu'un simple attouchement réduisait le tuyau ou l'instrument au silence.

Dans tous ces tuyaux, sans exception, la forme des cyclones se présentait normalement, quels que fussent la gêne imposée aux parois et l'effet produit sur le son. L'intermittence du courant dérivé et l'effet qui en résulte au dehors du tuyau étaient seuls affectés.

Parois manifestement vibrantes. — Des tuyaux à deux parois très fortes en bois ont deux parois faibles, en parchemin ou papier très fort, d'environ deux fois la largeur des précédentes. Des vis de rappel permettent d'écarter ou de rapprocher les parois en bois, d'où tension ou relâchement des parois faibles. Parmi ces tuyaux, les uns ont la bouche sur une des parois de bois; d'autres, sur une des parois faibles, renforcée à cette place par une mince bande de laiton.

Ouverts ou bouchés, tous ont donné le même résultat. En tournant les vis, on fait varier le son exactement comme celui d'une corde sonore.

Des tiges filetées passées dans une des parois et portant sur la paroi opposée, sont de construction plus simple et tout aussi satisfaisante. Ce sont alors les parois faibles qui font rappel. Ici l'obstruction dans la colonne aérienne est sans importance.

Des tuyaux, soit ouverts soit bouchés, tout en bois, dont généralement les seules parois latérales étaient faibles et avaient de deux à trois fois la largeur (intérieure) des autres parois, qui étaient rigides, ont tous donné le même résultat quant à la variation du son et à la réduction au silence.

L'attouchement ou la pression sur les nœuds faisait varier le son plus ou moins, sans l'étouffer ; un attouchement léger sur les ventres réduisait les tuyaux au silence. Une compression transposait le nœud à l'endroit com-

primé, et le son variait. On pouvait par ce moyen obtenir une succession de sons qui, sur un tuyau de $0^m,50$, a dépassé l'intervalle d'une quinte.

Une variation dans les courants extérieur et sortant correspondait toujours à ces manœuvres. Lorsqu'on réduisait le tuyau au silence, ces courants allaient joindre la paroi, et les ondulations disparaissaient; il n'y avait plus d'intermittence dans la sortie du courant dérivé.

Du sable, ou des semences d'un poids proportionné à la vigueur du courant et à la résistance des parois, sautillaient et se rangeaient en lignes nodales. Ces lignes persistaient, toujours les mêmes, tant qu'on ne fatiguait pas le tuyau, c'est-à-dire tant qu'on le faisait parler avec un courant de même force, et qu'on ne changeait pas la hauteur du son en modifiant, au moyen de la chambre mobile, la hauteur de la bouche. Il fallait pourtant bien les faire octavier, etc., pour obtenir la variation des lignes nodales. — On trace alors celles-ci en couleurs différentes. — Après quelques expériences, et sans fatiguer autrement les parois, les mêmes lignes ne se reproduisaient plus ; elles se déplaçaient et s'embrouillaient à ne plus s'y reconnaître. On peut y voir la preuve d'une modification dans l'arrangement moléculaire des parois.

Pour les expériences suivantes, on place les tuyaux horizontalement. Une tige, un crayon pour les plus faibles parois, repose par un bout sur la paroi, dans la concamération la plus voisine de la bouche, et est balancée convenablement sur le doigt. On la voit sautiller, et le son produit par ces chocs coïncide avec le son le plus bas du tuyau. Cela semble indiquer que l'écartement et le rapprochement des parois en vibration contribuent à la saillie intermittente du courant dérivé et au mouvement pendulaire du courant initial; ces saillies et ces rentrées donneraient alors le nombre de vibrations du son le plus bas émis par le tuyau.

On peut remplacer la tige ou le crayon en plaçant, au

bon endroit, de petits cailloux ou de petits poids, comme on en trouve aisément dans le jeu de poids d'une balance.

Lignes nodales. — Sans exception, sur tous les instruments qui ont été soumis à l'expérience et à parois théoriquement trop faibles, il se forme des lignes nodales, et on peut y supprimer ou altérer le son en mettant obstacle à la libre vibration des parois.

Les tuyaux sans fond ni tampon n'ont pas accusé de concamérations, mais des lignes droites à proximité des parois rigides. Ici, probablement, la paroi, n'étant pas soutenue aux extrémités, entraînait ses nœuds à la manière des cordes sonores.

Parfois cependant les nœuds s'approchent assez près de l'extrémité libre, comme on peut le voir en *a* (fig. 20, A).







Fig. 20, A. *Fig. 20, B.*

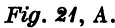
Dans cette figure, les lignes pleines sont les concamérations d'un tuyau de $0^{m}, 38 \times 54^{mm} \times 25^{mm}$, donnant un

de ses harmoniques. Le son fondamental a donné la concamération pointillée. En bas, les deux courbes sont confondues ; les deux droites se confondent de même avec les côtés des petites concamérations. Souvent la note la plus basse donnait deux concamérations (fig. 20, B).

Dans les tuyaux en forme de baïonnette (fig. 21, A), et dans ceux dont le bout supérieur est retourné vers le pied (fig. 21, B), les concamérations suivent la forme du tuyau.






Fig. 21, A. *Fig. 21, B.*

Les nœuds ne sont pas toujours en opposition sur les deux parois ; ce qui provient probablement d'une irrégularité dans leur épaisseur ou dans leur densité.

La flûte traversière, les tuyaux pyramidaux, les tuyaux à fond mobile, à fond incliné et celui où tout le courant initial était injecté, n'ont pas été construits avec des parois faibles. On reste libre de douter s'ils auraient produit les mêmes phénomènes.

Il se présente parfois des phénomènes que l'on qualifie d'accidentels, parce que l'on n'y comprend rien : tel est celui de la projection des globules de fumée, mentionné

plus haut. On les néglige d'ordinaire, et cependant un autre peut y trouver de la lumière. Les suivants, tout insignifiants qu'ils peuvent paraître, me semblent assez intéressants pour être mentionnés.

Sur un tuyau à deux parois de carton blanc, ayant l'épaisseur de deux cartes de visite superposées, surgissait un petit monticule de sable, d'environ 8^{mm} de base. Le sable montait dans l'intérieur du monticule et se déversait sur les flancs, pour être continuellement résorbé à la base. Cela se faisait toujours, mais rien de pareil ne s'est présenté sur aucun autre tuyau.

Sur un autre tuyau de bois, *une seule fois*, un petit nuage de poussière s'est levé et a vagué une dizaine de fois, aller et retour, à un centimètre à peu près de la paroi, d'un bout de la concamération à l'autre — voyage d'une dizaine de centimètres — puis il s'est dissipé.

Deux tuyaux, faits en même temps, dont les dimensions étaient $0^{m},40 \times 55^{mm} \times 25^{mm}$, la largeur de la bouche 20^{mm}, la hauteur 10^{mm}, et dont la chambre était de construction normale, ont montré, entre le courant sortant et le courant extérieur, un secteur indépendant, absolument libre de fumée. On pourrait en chercher l'explication dans le peu de largeur de la bouche et, par conséquent, des courants : le courant d'entraînement pouvait ainsi, semble-t-il, s'introduire facilement sur les côtés. Mais cela ne se faisait pas avec d'autres courants moins larges encore, par exemple de 15^{mm} au lieu de 20^{mm}. Une douzaine d'autres tuyaux ont été construits pour reproduire le même phénomène ; mais ils n'ont pas répondu à mon attente, malgré de nombreux remaniements, tels que amincissement des parois, raccourcissement, etc., auxquels la plupart n'ont pas survécu.

Percussion faisant alterner des harmoniques : 1° Dans les tuyaux à parois faibles. — Des tuyaux en sapin, dont les parois sont amincies en proportion de leurs dimensions, par exemple $2^{mm},5$ pour un mètre de longueur, et

plus minces encore pour des tuyaux plus courts, donnent, sous une pression de $0^m,08$ d'eau dans le soufflet, un son vacillant, musicalement mauvais, parce que les parois sont trop faibles pour cette pression. On corrige ce défaut, en diminuant la pression jusqu'à faire disparaître le son fondamental; mais, de même que dans le premier cas, le son qui persiste n'est pas stable, comme si deux sons partiels se disputaient la prééminence; cependant il est amélioré. Si alors, avec un marteau en liège, ayant pour manche une tige très flexible, on applique vivement un coup à tel endroit déterminé, que l'on trouve par tâtonnement, ce choc fait dominer un des harmoniques qui persiste, et le son est stable. Un coup appliqué sur un autre point fait dominer un autre harmonique qui persiste à son tour. On peut les faire alterner à volonté.

Les tuyaux bouchés (dont les tampons doivent être collés) se comportent en ceci comme les tuyaux ouverts.

2° *Dans les tuyaux à parois rigides.* — Un tuyau de viole de gambe, par conséquent tuyau *sonore ouvert*, en sapin rouge compact et résistant bien à de vigoureux coups de marteau de menuisier, avait pour dimensions $1^m,87 \times 74^{mm} \times 65^{mm}$; épaisseur des parois 11^{mm}; largeur de la bouche 60^{mm}, hauteur 9^{mm}; chambre et lèvre inférieure mobiles; pression dans la chambre, 27^{mm} d'eau. Le courant initial était dirigé un peu trop vers l'intérieur au moyen de la lèvre inférieure mobile. La figure 4 donne la coupe d'une de ces chambres. Quand le tuyau parle dans ces conditions, le son est un peu vacillant; il ne donne le son fondamental, avec une bouche aussi basse, que parce que le courant est très faible. Plusieurs harmoniques l'accompagnent; le deuxième domine les autres.

Un coup sec bien appliqué à environ $0^m,42$ du fond, étouffe les deux premiers sons partiels (fondamental et octave); le troisième devient le son le plus bas. Un coup donné à environ $1^m,10$ du fond amène l'octave. Les sons

ainsi obtenus sont stables et persistent; on peut les faire alterner à coups de marteau.

Il faut frapper à coups *secs*, c'est-à-dire de telle manière que le marteau rebondisse, sans le moindre arrêt sur la paroi. Le coup régularise alors la vibration de la paroi, et produit un ventre à l'endroit frappé. Un arrêt du marteau sur la paroi étoufferait, au contraire, la vibration excitée en cet endroit.

Sur les tuyaux à parois rigides, cette expérience est des plus difficiles, et on ne la réussit pas toujours. Il arrive que, du jour au lendemain, on doit modifier la disposition de la bouche ou la force du courant; l'endroit à attaquer varie aussi plus ou moins.

D'autres tuyaux de ce genre donnent des résultats un peu différents; mais, en somme, on peut y obtenir deux sons partiels qui dominent et les faire alterner à coups de marteau.

L'expérience est relativement facile sur des tuyaux à parois faibles.

Effet des coups de marteau sur les parois. — Prenons un tuyau au repos. Un coup de marteau sur une des parois fait jaillir l'air; la réaction le fait rentrer; une fluctuation rétablit l'équilibre.

S'il passe dans le tuyau un courant initial dirigé un peu trop vers l'intérieur, un coup sur la paroi fera fléchir par impulsion ce courant, amènera sa division sur la lèvre supérieure et toutes les conséquences qui s'ensuivent pour produire le son.

Si le courant est dévié vers l'extérieur, la réaction aura le même effet, par aspiration.

Si l'écart du courant est considérable, un coup appliqué sur un nœud tire du tuyau un son comme on en tire d'une barrique vide; le tuyau ne *parle* pas, parce que la vibration imprimée à la paroi n'est pas d'accord avec celle de la colonne aérienne : l'une étouffe l'autre. Au contraire, un coup appliqué à un ventre imprime à la paroi une

vibration de même période qu'une de celles qui conviennent à la colonne aérienne : les deux vibrations se soutiennent et se renforcent mutuellement.

Les tuyaux où l'on fait alterner deux sons partiels à coups de marteau, confirment cette déduction.

Une disposition spéciale fait qu'un tuyau parle mal, parce que la vibration des parois et celles de la colonne aérienne ne sont pas de même période; elles ne s'accordent pas sans intervention : le son est instable, vacillant. Un coup de marteau imprime à une des parois la vibration qui s'accorde avec celle d'une des divisions de la colonne; celle-ci se divise, les deux vibrations se soutiennent mutuellement, et il en résulte un son stable. Mais les parois se prêtent à un deuxième mode de vibration, qui est d'accord avec une autre division de la colonne. Le son qui en résulte, et qu'on amène aussi en faisant, par un coup de marteau, changer la vibration de la paroi, a les mêmes qualités que le premier, et on peut les faire alterner à volonté en agissant sur les parois, qui agissent à leur tour sur la colonne aérienne. Ceci prouve que les parois, aussi bien que la colonne, ont leurs vibrations périodiques et contribuent à la formation du son.

A ces observations relatives à la production *successive* de différents sons par la percussion des parois, je rattacherai quelques expériences sur la manière d'observer des sons partiels *simultanés,* notamment par l'auscultation, c'est-à-dire en appuyant l'oreille sur les parois des tuyaux.

Harmoniques distincts. Auscultation. — Voici un tuyau bouché, ayant pour dimensions $0^{m},98 \times 90^{mm} \times 64^{mm}$. Les parois, en sapin compact, ont une épaisseur de 12^{mm}; la bouche est sur l'une des parois étroites, sa largeur est de 40^{mm} et sa hauteur de 6^{mm}; la largeur de la lumière est de $0^{mm},7$; la lèvre inférieure et la chambre sont mobiles. Un manomètre, inséré dans la chambre, indique une pression de 5^{mm} d'eau.

Dans cet état, le tuyau donne distinctement l'accord

ut, fa, la, de l'octave de 2 pieds. Toutes ces notes sont tardives, en commençant par la plus basse; elles se succèdent dans l'intervalle d'environ deux secondes, et restent plus distinctes que pareil accord produit par tout autre instrument, excepté peut-être la harpe éolienne par un vent très faible. Leur douceur a un charme peu commun, et leur intensité est assez grande pour qu'on les entende dans une chambre spacieuse.

Il y a des tuyaux, celui qui précède est du nombre, dont on peut réduire l'intensité à tel point qu'on n'entende plus qu'un léger bruissement en approchant l'oreille de la bouche autant que faire se peut, et dont on entend parfaitement l'accord en appuyant l'oreille sur la paroi; plus la pression de l'oreille contre la paroi est forte, mieux on entend. Si immédiatement après on approche l'oreille de la bouche du tuyau, on y perçoit très faiblement l'accord.

Pour ausculter commodément un petit tuyau, on l'adapte au bout d'un porte-vent flexible. En le pressant contre l'oreille, on évitera de gêner la libre vibration de l'air aux extrémités, ce qui ferait varier la hauteur des sons.

Avec les chambres tournantes, les expériences que nous venons de rappeler n'offrent pas trop grande difficulté. On ne doit cependant pas s'attendre à des effets invariables, surtout si la lèvre inférieure est mobile aussi, ce qui est très avantageux pour régler le volume du courant, mais difficile à mettre toujours au même point. Malgré quelque variation dans les phénomènes, on trouve cependant toujours concordance entre les résultats. Les trois dernières expériences ont été prises sur le fait, alors que la réussite ne laissait rien à désirer.

On n'en finirait pas, si l'on voulait donner le détail de tous les effets qu'on obtient sur ces tuyaux, sonores ou autres, quelles qu'en soient les proportions. D'ailleurs, une partie en est déjà connue (1). Je n'ajoute qu'une der-

(1) Voir, entre autres, une belle série d'expériences dans le mémoire de

nière observation. Lorsque le courant est dévié au point que le tuyau ne puisse pas parler sous l'influence d'un son musical ou d'un seul coup bien appliqué, il suffit, pour le faire parler, de lancer un courant continu sur le courant initial, s'il est dévié au dehors, ou par le haut du tuyau dans le cas contraire. On réussit encore, mais moins bien, par un tambourinage sur les parois, plus ou moins dru d'après leur résistance, et portant sur les ventres de vibration.

Tuyaux jumeaux à bouches distinctes. — Deux tuyaux bouchés à parois *très rigides* ont une paroi commune faible. Quelques exemplaires ont leurs bouches l'une à côté de l'autre. Il y en a dont la bouche se trouve à côté de la paroi postérieure de leur voisin; d'autres ont leurs bouches diamétralement opposées. Rien ne les distingue des bouches ordinaires.

L'expérience suivante a été faite sur des tuyaux ayant pour dimensions $0^{m},59 \times 76^{mm} \times 50^{mm}$: épaisseur des parois extérieures en sapin, 10^{mm}; la paroi commune, en peuplier du Canada très mou, a 3^{mm} d'épaisseur. Cette dernière paroi est renforcée des deux côtés par des pièces de 6^{mm} d'épaisseur, sur toute l'étendue de la course des tampons, afin de résister à leur pression. Un de ces tuyaux a son pied, l'autre est percé sur le côté pour l'introduction d'un porte-vent. On les égalise d'intensité en les faisant parler alternativement. La paroi médiane ne supporte pas un fort ébranlement; une pression de 20^{mm} d'eau dans les chambres convenait très bien. Je donne ce dernier détail comme pouvant être intéressant, mais il n'est pas nécessaire d'avoir recours au manomètre; l'oreille est le meilleur guide.

A l'unisson, quand ils sont de même longueur, les deux tuyaux y persistent quand on enfonce le tampon A de

M. W. Van Schaik, *Sur la production du son dans les tuyaux à bouche* (ARCHIVES NÉERLANDAISES, t. XXV, p. 218). L'auteur les appelle *tuyaux sensitifs*. J'ai cru devoir m'en tenir au terme technique *tardif*.

30mm. Le son monte d'un peu moins d'un demi-ton. Dans cet état, on peut enfoncer le tampon B de 55mm : le son unique, produit par les deux tuyaux monte de nouveau, à peu près de la même quantité, mais l'unisson persiste.

Plus la paroi médiane est mince, plus on peut augmenter la différence de longueur sans faire varier le son. Évidemment c'est la paroi mince qui domine, qui règle la saillie alternative des courants dérivés et, par conséquent, la hauteur du son de l'un et de l'autre tuyau.

Le résultat est le même, quelle que soit la place des bouches.

Quelle que fût cette place, aucun de ces tuyaux n'a interféré avec son voisin.

Tuyaux jumeaux à bouche commune. — Les tuyaux précédents ne présentent aucune difficulté de construction pour une main un peu exercée. Ceux-ci peuvent en offrir, notamment parce que, si toutes les pièces sont fixes, la bouche est inabordable. C'est pourquoi j'indiquerai, avec quelques détails, deux manières dont je les ai construits.

Première construction. Deux tuyaux identiques, ayant trois parois rigides, sont réunis par une paroi commune, qui peut être faible ou rigide, suivant les cas. La paroi commune est amincie des deux côtés, de manière à former une lèvre supérieure commune *a* (fig. 22, A). Celle-ci se trouve en regard de la lumière, pratiquée au milieu du fond *c'c'* de la chambre *cc*. Cette lumière n'est qu'un trait de scie, élargi tant soit peu vers le bas, où il aboutit au trou *t*, cavité de la chambre, qui correspond, du côté opposé, avec le pied *p*. La chambre est mobile à l'intérieur du tuyau ; on peut l'enfoncer ou la retirer pour faire varier la hauteur de la bouche ; on peut aussi l'incliner à droite ou à gauche pour modifier la direction du courant initial. Une garniture en peau blanche, *bb*, indiquée par la ligne pointillée, assure une fermeture hermétique et la fixité nécessaire jusqu'à ce que, le tuyau parlant bien, on

fixe, au moyen des vis *v*, *v*, la chambre dans la position trouvée par tâtonnement.

Deuxième construction. Soit M (fig. 22, B), un tuyau de construction ordinaire, sauf que la paroi de face est amincie *des deux côtés* pour former la lèvre supérieure, et que l'arête de celle-ci correspond au milieu de la lumière, qui s'élargit très peu vers le bas. La paroi de

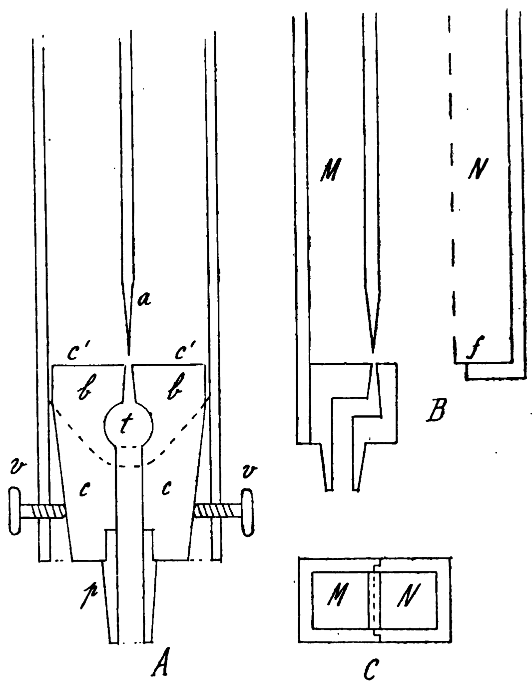


Fig. 22.

face porte sur ses bords deux rainures, comme on le voit en C. Une seconde partie N consiste en trois parois et un fond *f*. Des languettes, pratiquées le long des côtés libres des parois latérales, s'engagent dans les rainures de la partie M. Le fond va alors joindre la lèvre inférieure : il est bon que ce joint soit garni de peau.

Cette construction, tout aussi simple que la première, se prête à des expériences que l'autre ne permet pas. Mais

on pourrait objecter qu'ici les deux tuyaux ne sont pas matériellement identiques, tandis qu'ils le sont évidemment dans le premier cas. Néanmoins, les colonnes aériennes sont bien identiques quand M et N sont réunis. Ces tuyaux symétriques *parlent avec la plus grande facilité*, quoiqu'ils paraissent se trouver dans les meilleures conditions pour l'interférence. Des tuyaux *triples*, construits d'une manière analogue, parlent aussi sans la moindre difficulté. Voici quelques-uns des résultats obtenus.

1. Tuyau double construit d'après la première méthode. Les deux moitiés étant ouvertes en haut : son fondamental la_3; 1er harmonique la_4. On obtient aussi le 1er harmonique, avant le son fondamental, en soufflant *très faiblement*. Le son baisse légèrement, lorsqu'on bouche peu à peu l'une des deux moitiés. En bouchant complètement l'une des deux moitiés, *n'importe laquelle*, on obtient la suite fa_3, ut_4, fa_4, $ré_5$.

2. Tuyau construit d'après la 2e méthode, avec les dimensions du précédent. La partie M seule donne le fa_3; N étant réuni à M, on obtient, en laissant ouvertes les deux parties, la_3 et la_4, etc.

Je m'abstiens de faire des conjectures sur la manière dont parlent ces tuyaux; mais je répète qu'ils parlent parfaitement bien, quoiqu'on ait affirmé qu'ils ne voulaient pas parler, et qu'ils semblent, en effet, condamnés au mutisme par la théorie des interférences, telle du moins que l'entendent plusieurs auteurs. Ces tuyaux n'interfèrent pas plus entre eux que les tuyaux jumeaux à bouches indépendantes. Et en général, je puis déclarer que jamais, durant les longues années consacrées à ces recherches, malgré le très grand nombre de tuyaux de tout genre sur lesquels j'ai fait les essais les plus divers, soit seul, soit en présence d'expérimentateurs exercés ; jamais, dis-je, il ne m'a été possible d'observer un seul phénomène d'interférence, en ce sens que jamais je n'ai rencontré

aucun groupe de deux ou plusieurs tuyaux ayant la faculté de se maintenir en vibration de telle manière que les ondes émises se neutralisent les unes les autres.

Cette affirmation ne manquera pas de surprendre maint professeur ou amateur qui a dans sa collection d'instruments un appareil à interférences, où deux tuyaux, parlant fort bien isolément, ne donnent presque plus de son quand on les attaque à la fois. C'est que, par la disposition et les dimensions des conduits, l'appareil ne fournit de vent suffisant que pour un seul tuyau. On peut s'en assurer en les alimentant d'une manière suffisante.

Tuyaux tardifs. — Les facteurs d'orgues appellent *tardif* un tuyau qui ne parle pas *prestement.* Parmi les défectuosités qui nuisent à la *prestesse*, j'examinerai la direction anormale du courant initial, et j'indiquerai l'action que les parois peuvent exercer dans certains cas.

La déviation du courant initial peut être si peu considérable que le tuyau tarde très peu; elle peut être assez grande, en passant par tous les intermédiaires, pour qu'il ne parle pas sans un secours extrinsèque continu : il est devenu *taciturne.*

1° *Courant dévié vers l'intérieur.* Tuyau ouvert, dimensions $1^{m},00 \times 0^{m},12 \times 0^{m},04$; largeur de la bouche 37^{mm}, hauteur 20^{mm}; chambre à pivots (fig. 4); lèvre inférieure mobile.

Par tâtonnement, le courant initial a été dirigé à l'intérieur de manière que le son commence par un *bruissement,* suivi d'une résonance : le premier harmonique se fait entendre, puis le son fondamental éclate. Le tout dure quelques secondes, parfois au delà d'une demi-minute. La durée dépend de la manière dont on abaisse la touche, parfois du choc du soufflet, ou de l'agitation de l'air, etc.

Le premier cyclone mesure 28^{cm}, le second 16^{cm}.

Le premier courant dérivé n'a pas tout d'abord la force nécessaire pour traverser et repousser le courant initial,

qui entre dans le tuyau sans se diviser sur la lèvre ; le courant extérieur est absent. Une petite quantité de fumée, sans être expulsée, s'égare au dehors par la bouche ; une partie en est ramenée à l'intérieur par le courant d'entraînement.

Le premier harmonique se fait entendre, dès que le courant dérivé saillit ; en saillissant, il fait dévier le courant initial, dont la division commence à se faire sur la lèvre. Les courants extérieur et sortant s'éloignent très peu de la face du tuyau, et les ondulations sont courtes. Soudain les courants se développent, les ondulations s'allongent et le son fondamental éclate. Ces trois derniers phénomènes paraissent se produire au même moment.

Lorsque le courant initial est dans sa direction normale, les courants au dehors sont beaucoup plus considérables que dans le cas présent.

2° *Courant dévié vers l'extérieur*. Quand le courant passe devant la bouche de manière que le son musical ne survienne qu'après quelques secondes, il se fait une résonance comme celle d'un résonateur placé à proximité d'un courant libre.

Un courant d'entraînement ou d'affluence entre par le haut du tuyau et sort par la bouche ; il entraîne une petite quantité de fumée qui s'égare à l'intérieur, à cause de la raréfaction qui s'y fait. Peu à peu cette quantité augmente et tourne très mollement au bas du tuyau ; une partie s'en va par où elle est venue, l'autre monte et revient vers le fond ; le refroidissement y contribue probablement. Ce tourbillon paisible n'atteint pas la moitié de la hauteur du cyclone qui se forme soudainement et fait éclater le son fondamental.

Ici parfois le courant dérivé n'est pas tout à fait chargé de fumée quand le tuyau commence à parler. Cela fait présumer que l'extrémité finale du courant dérivé de beaucoup de cyclones progresse par aspiration et que cette aspiration intervient dans tous les cas.

Il ne se forme qu'un seul cyclone; il mesure 22^{cm}.

Si l'on tourne lentement la chambre pour augmenter la déviation du courant, le cyclone diminue graduellement d'un tiers environ; le son y perd en qualité, mais sa hauteur ne varie pas sensiblement. Enfin, le cyclone disparaît et le son s'éteint.

3° *Déviation du courant à l'intérieur ou à l'extérieur.* Quand la déviation du courant est telle, soit d'un côté soit de l'autre, que le tuyau ne demande qu'un minime secours pour parler, et que cependant ni le choc du soufflet, ni l'agitation accidentelle de l'air, ne puissent le mettre en train (ce qui fausserait l'expérience), il ne perd que momentanément sa voix quand, après l'avoir fait parler, on quitte la touche et que, sans tarder, on l'abaisse prestement de nouveau. Il n'est guère possible que la colonne aérienne reste en vibration pendant cet intervalle, si court qu'il soit; mais les vibrations des parois ont pu se maintenir à un degré suffisant pour reprendre régulièrement à la nouvelle arrivée du courant. Cette différence entre les gaz et les solides peut se concevoir comme suit.

Les corps gazeux, à cause de leur faible densité et de la grande mobilité de leurs molécules, correspondent immédiatement et manifestement à l'impulsion des ondes sonores ; la première y fait un déplacement moléculaire égal à ceux que produisent les ondes subséquentes. L'intensité a sensiblement toute sa valeur dès le premier ébranlement. Mais comme ces corps transmettent tout ce qu'ils reçoivent, il n'y a pas de mouvement de retour : ils tombent au repos, dès que l'excitation cesse.

Au contraire, à cause de leur grande densité et de la moindre mobilité de leurs molécules, les corps solides, tout en correspondant aussi promptement aux ondes sonores, ne le manifestent pas immédiatement. Il faut un grand nombre d'ébranlements pour donner aux vibrations de ces corps toute leur intensité; mais, quand l'exci-

tation cesse, ils reviennent d'autant plus lentement au repos qu'ils ont pris plus de temps pour acquérir le mouvement : ils finissent par rendre tout ce qu'ils ont reçu.

Les faits qui viennent d'être exposés prouvent, si je ne me trompe, que les parois exercent bien réellement une influence considérable sur la formation du son. Il n'est pas aussi aisé de déterminer avec précision en quoi consiste cette influence et comment elles l'exercent.

Pour rester sur le terrain des faits, je ferai remarquer que les parois vibrent déjà dans toute leur longueur, alors que la colonne gazeuse n'est encore ébranlée que sur une longueur relativement faible. Pour s'en convaincre, il suffit de comparer entre elles les vitesses de propagation des ondes sonores dans l'air et dans les solides qui forment habituellement la matière des parois.

En prenant pour unité la vitesse de propagation dans l'air, cette vitesse est, en nombres ronds, dans le plomb, 4 ; dans l'étain, 7 à 7 1/2 ; dans le bois de chêne, 10 à 12 ; dans le bois de sapin, 12 à 17 environ. C'est dans le plomb que cette vitesse est la plus faible, vu le peu d'élasticité de ce métal. C'est sans doute une des causes — à part son peu de ténacité et de résistance — pour lesquelles le plomb est la matière la plus ingrate dont on fabrique des tuyaux. Il n'en est pas moins vrai que, même dans ce cas, le plus défavorable de tous, les ondes du bruissement n'ont encore pu ébranler la colonne aérienne que sur un quart de sa longueur, au moment où elles ont atteint et mis en vibration toute la longueur des parois. De même, la longueur de la colonne gazeuse ébranlée ne serait qu'un dixième environ pour un tuyau en chêne, et un quinzième environ pour un tuyau en sapin.

A plus forte raison resterons-nous beaucoup au-dessous de la vérité, en admettant que la progression du courant initial et des courants du premier cyclone jusqu'au moment où le courant dérivé fait sa première saillie, c'est-à-dire forme la première demi-onde du son propre du tuyau,

que cette progression, dis-je, dure une fraction de seconde pendant laquelle les ondes du bruissement ont dépassé la longueur du tuyau.

En d'autres termes, bien avant que le tuyau émette sa première demi-onde, la colonne aérienne est assaillie de tous côtés par les vibrations des parois, qui ont sur elle une avance considérable, et ces assauts continuent aussi longtemps que le tuyau parle. Ces vibrations préliminaires, indifférentes comme celles du bruissement lui-même, ne sont peut être que moléculaires. Elles doivent cependant pouvoir au moins tirer de leur inertie apparente les parois et la colonne gazeuse, et les disposer ainsi aux vibrations sonores proprement dites.

Que les saillies du courant dérivé produisent des ondes puissantes, personne n'en paraît étonné ; mais que les ondes du bruissement impriment des vibrations quelconques à des parois qu'on s'est habitué à considérer comme inébranlables, plusieurs y trouveront peut-être de quoi se récrier. Quelle petite cause pour un si grand effet! Il y a cependant des effets semblables, et même de plus grands, de même nature, qui passent inaperçus à force d'habitude. Ainsi, on se trouve souvent dans des conditions telles que les sons ne peuvent nous arriver que par l'intermédiaire des planchers, des murs, etc. Il faut donc alors que les ondes traversent ces obstacles, en les mettant en vibrations de même période.

Personne ne conteste que le bois ne soit corps sonore. Mais n'est-il pas étrange de voir les mêmes auteurs qui lui reconnaissent cette qualité, en parlant, par exemple, du claque-bois, la lui refuser quand ce même bois devient paroi de tuyau, c'est-à-dire quand il est placé précisément dans d'excellentes conditions pour être corps sonore ?

Construits en bois de même essence que les tuyaux, des meubles d'un poids énorme, des stalles, des bancs, placés à grande distance de l'orgue, dans les conditions les plus défavorables, se mettent en vibration par influence malgré

les étouffoirs, les personnes qui y sont assises, et qui, malgré elles, participent à ces vibrations. Que sont, en comparaison de masses semblables, les parois de nos tuyaux? Se peut-il que ces parois, qui enserrent les foyers sonores, ne participent pas à leurs vibrations, et ne fassent pas partie constituante de ces appareils ?

Ici se dressent devant le chercheur des questions du plus vif intérêt. Il voudrait pénétrer plus avant, et préciser en quoi consiste cette influence incontestable des parois. Concourent-elles à régulariser, ou même à produire, les intermittences dans les saillies du courant dérivé ? Prennent-elles, dans les tuyaux à parois rigides, des mouvements d'ensemble, en se divisant en concamérations, comme dans les tuyaux à parois faibles ? Si l'on admet ces mouvements, comment se produisent-ils ? Dépendent-ils principalement de la nature et des dimensions des parois ? Est-ce peut-être l'invasion du courant injecté qui écarte les parois dans une concamération voisine de la bouche ? Quel effet produisent, à l'extrémité de la colonne aérienne, les vibrations qui, transmises par les parois, y arrivent en avance sur les ondes directes ?

Ces questions, et bien d'autres semblables, ne semblent guère pouvoir être tranchées par des recherches purement expérimentales. Je ne préjugerai donc pas la solution que l'avenir peut leur réserver. Du moins, les faits certains, exposés ci-dessus, me semblent légitimer la conclusion suivante :

Le tuyau est corps sonore conjointement avec la colonne aérienne ; ils travaillent de concert et sont inséparables. Le tuyau et son contenu ne font qu'un : c'est le corps et l'âme.

Il me reste à mentionner brièvement le résultat des recherches faites sur quelques autres instruments qui ne sont pas rangés d'ordinaire parmi les tuyaux sonores, mais qui sont néanmoins compris dans la définition générale que nous avons adoptée. Après les développements donnés jusqu'ici, il suffira d'indiquer *de visu* et sans longues explications les principaux faits observés.

APPEAU

L'*appeau* ou *réclame* est une petite boîte dont le fond et le couvercle sont percés au centre. Par aspiration et par insufflation, on obtient une grande variété de sons, dont la hauteur dépend principalement de la force du courant.

Deux planchettes A et B, épaisses de 4^{mm} (fig. 23), collées entre deux glaces, donnent une tranche médiane de l'appeau. Le tout est inséré dans un pied de tuyau.

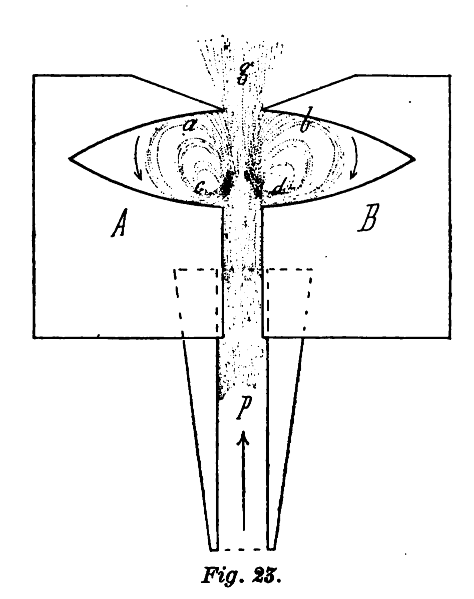
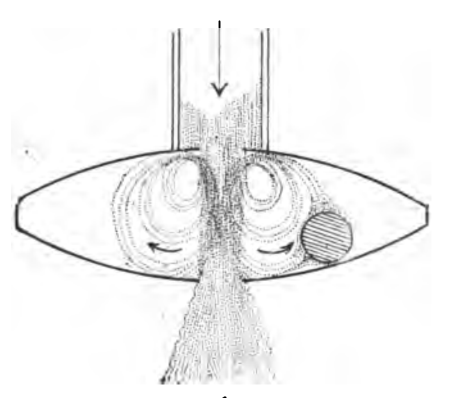


Fig. 23.

Le courant lancé par le pied *p* fait un vide en *c* et en *d ;* il s'élargit en cône et atteint l'orifice opposé ; c'est le *courant initial.* La partie centrale passe librement au dehors ; c'est le *courant extérieur g*, qui produit, après sa sortie, un *courant d'entraînement.* Les parties latérales du courant injecté, dont la partie centrale a sailli, sont réfléchies sur la paroi en *a* et en *b*, et aspirées par le vide fait en *c* et en *d*. Il se forme ainsi des courants qui

correspondent aux *courants injectés* et *dérivés* des tuyaux et deviennent des *courants sortants*. De chaque côté, il se forme un cyclone.

Cette expérience demande un courant si faible, qu'on ne l'obtient qu'en remuant tout doucement avec la main la table du soufflet épuisé. L'appareil est fixé sur un porte-vent dans lequel on a introduit un peu de fumée. En remuant la table du soufflet, on provoque des courants entrants d'air et des courants sortants de fumée. Les cyclones se forment avec une violence dont on n'a pas d'idée; les courants dérivés se divisent en plusieurs branches, comme dans le tuyau de la figure 13. On les voit très bien, malgré l'exiguïté de l'appareil ($6^{cm} \times 3^{cm}$), parce que les courants d'air et de fumée se succèdent alternativement.



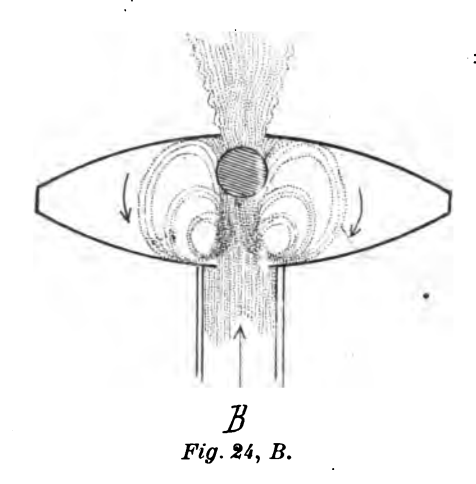
A

Fig. 24, A.

On peut faire cette expérience sans fumée avec un appeau dont au moins une des parois doit être concave à l'intérieur; une boîte de montre d'ancien modèle convient parfaitement. On y introduit une petite boule. On applique un porte-vent du côté du verre, et on penche l'appeau pour écarter la petite boule; quand le courant passe, on tourne l'appeau pour la faire passer verticalement de haut en bas (fig. 24, A). Avant d'en arriver

là, la boule est en course sur le fond; mais elle est arrêtée par le courant dérivé qui la rejette et la relève chaque fois que le fond concave la ramène. Quand la boule est bien choisie, il est rare qu'elle aille boucher le trou de sortie.

Lorsqu'on fait passer le courant en sens inverse, c'est-à-dire de bas en haut, quelque précaution que l'on prenne, la boule est lancée de bas en haut dans l'ouverture, dès qu'elle vient au contact du courant dérivé (fig. 24, B). On comprend pourquoi à l'inspection des figures.



B
Fig. 24, B.

Dans l'appeau, le cyclone est annulaire.

Un manomètre à alcool, passé par la paroi cylindrique, accuse toujours une pression pour un courant propulsé et une dépression pour un courant par aspiration. Le liquide ne peut pas, en effet, indiquer les condensations et les dilatations qui se succèdent trop rapidement. Il accuse simplement la pression moyenne dans l'instrument.

Lorsqu'on siffle avec la bouche, soit en soufflant, soit en aspirant, un manomètre placé entre les lèvres donne les mêmes indications. Il est très probable que tout se passe comme dans l'appeau.

APPEAU OUVERT

Lorsqu'un appeau doit parler par *aspiration,* il est bon qu'il soit bien fermé aux joints ; cependant une fermeture imparfaite n'empêche pas la production du son.

Pour le faire parler par *insufflation,* on peut enlever toute la paroi cylindrique, si les parois percées sont assez rapprochées ; deux cartes de visite proprement percées, maintenues entre les pouces et les index, ou mieux une bande de métal repliée, conviennent très bien, seulement il faut un peu d'exercice pour réussir.

Par aspiration, l'air qui afflue de tous les côtés sans être contrarié ne forme pas de cyclone, et il n'y a pas production de son musical ; il y a du bruissement. Par insufflation, on obtient un son musical. Il est probable qu'il se passe quelque chose d'analogue à ce que l'on observe dans les tuyaux ouverts aux deux bouts. Ceci n'a pas été soumis à l'expérience ; c'est une solution par analogie, comme pour la *bouche appeau.*

APPEAU A PAROIS FAIBLES

Un appeau en fer-blanc trop mince, de cinq centimètres de diamètre, ne parle pas par insufflation quand on applique les lèvres en plein sur la paroi, parce qu'on en arrête les vibrations ; c'est une analogie avec les tuyaux à parois faibles. Il parle quand on l'insère entre les lèvres, ce qui laisse libres les parois planes. Par aspiration, il est un peu moins délicat.

TOUPIE D'ALLEMAGNE

Il y a des instruments à embouchure de flûte, tels que la toupie d'Allemagne et le diable, où le mouvement qu'on leur imprime prend l'initiative pour former le son. Ces instruments n'entrent pas dans la catégorie de ceux que

nous avons étudiés. Il s'y forme des cyclones, comme dans les tuyaux circulaires, quand on dirige un courant d'air sur l'embouchure pour les faire parler. Il est probable qu'il s'en forme un, quand on supplée à ce courant en les faisant tourner, ou en faisant mouvoir l'embouchure à la rencontre de l'air.

SIRÈNE DE CAGNIARD

Dans la sirène de Cagniard de Latour, c'est un courant qui prend l'initiative pour former le son, mais une moitié de l'instrument est mobile sur l'autre.

Comme pour l'expérience de l'appeau, des planchettes découpées, maintenues entre deux glaces, figurent une tranche de l'instrument à travers deux trous qui se correspondent.

Quand un trou empiète sur un autre, il se fait, avant leur coïncidence, soit un tourbillon, soit un cyclone (il est difficile de s'en assurer, mais ici c'est peu important). Il s'en fait un deuxième, de sens inverse, durant l'autre moitié du passage.

Il est probable que le mécanisme de la formation du son des tuyaux, etc., qui parlent dans l'eau, est le même que celui des instruments qui parlent dans l'air.

RÉSUMÉ

1. Un tuyau sonore à bouche de flûte consiste en une colonne aérienne, suffisamment isolée par des parois rigides, de grande longueur par rapport à son diamètre ou à sa section transversale (10 à 12 fois), où un courant d'air prend l'initiative pour produire le son.

Toute masse d'air suffisamment isolée par des parois fixes, quelles que soient leur forme et leur résistance, fortes ou faibles, où un courant prend l'initiative pour produire le son, est régie par les mêmes lois. Le mécanisme de la production du son est le même.

2. Un courant d'air, en jaillissant, produit un *bruissement*. C'est *une confusion de sons dont aucun ne domine.* Il donne le branle à l'instrument et facilite sa mise en vibration pendulaire.

Si dans les sons du bruissement, sons dont nous ne pouvons apprécier ni le plus grave ni le plus aigu, il y en a qui correspondent au son propre de l'instrument, la vibration sonore peut s'établir par influence avant la formation des cyclones.

3. Après les courants d'air propulsés, ce sont les courants par entraînement qui jouent le principal rôle dans le mécanisme de la formation du son dans les instruments dont nous traitons.

Dans tous ces instruments, quelle que soit leur forme, il ne se produit de son musical qu'à condition qu'il s'y forme au moins un cyclone. Il s'en forme parfois un second, dont les fonctions ne me sont pas connues.

Il y a des cyclones fermés et des cyclones ouverts.

Le cyclone fermé est un courant, modifié de telle sorte par l'entraînement et la résistance de l'air et par la proximité d'obstacles qui s'opposent à sa libre progression et à la libre affluence de l'air ambiant, qu'il revient, totalement ou en partie, vers son origine et traverse par intermittence le courant générateur.

Le cyclone ouvert est un courant qui, pour les mêmes causes, en suscite par entraînement un autre qui vient de même traverser par intermittence, près de son origine, le courant générateur.

4. L'intermittence se fait avec le concours de la masse aérienne et des parois.

L'intermittence du courant dérivé et le balancement du courant initial qui en résulte, produisent, à l'intérieur de l'instrument, des condensations et des raréfactions alternatives, qui s'y propagent et se propagent au dehors. Ce sont des ondes condensées et dilatées, dont le nombre détermine la hauteur du son.

Les condensations et les raréfactions sont produites par invasions et par expulsions alternatives des courants. La condensation est produite par invasion et la raréfaction par exclusion, comme le montre le tuyau où aucun courant ne sort par la bouche (p. 43).

Un tuyau peut parler sans que le courant initial se divise sur la lèvre (même expérience).

Il y a des courants giratoires qui ne sont pas des cyclones, parce que leur progression est continue; nous les avons nommés *tourbillons*. Tels sont, en général, ceux dont le courant dérivé, ou suscité, ne traverse pas le courant initial, ou le traverse sans intermittence.

5. Les parois des tuyaux qui ne sont pas assez résistantes sont *implicitement* reconnues comme corps sonores, conjointement avec la colonne aérienne, dans tous les traités de physique qui en font mention. Les expériences prouvent la réalité de ce fait.

Les expériences sur les tuyaux à parois résistantes où, par des coups de marteau, l'on amène alternativement des sons partiels différents, et l'expérience 3° sur les tuyaux tardifs (p. 65), donnent une forte présomption pour admettre que les parois, même rigides, sont corps sonores conjointement avec la colonne aérienne.

Dans tous les instruments où l'on peut mettre obstacle à la vibration sonore des parois, le son musical ne se produit pas.

6. Il est probable qu'il se forme des cyclones dans les instruments tels que la toupie d'Allemagne, quand le courant est remplacé par le mouvement de l'embouchure à la rencontre de l'air.

Imprimerie POLLEUNIS & CEUTERICK, 30, rue des Orphelins, Louvain.
Même maison à Bruxelles, 37, rue des Ursulines.

